

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Automàtica i Robòtica

Programació d'una cèl·lula robòtica d'inspecció

MEMÒRIA

Autor: David Luna i Pérez
Director: Ramon Costa Castelló
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte tracta de la utilització de diverses tecnologies i la creació dels arxius de programació necessaris per realitzar programes d'inspecció en una cèl·lula de metrologia. La seva finalitat és inspeccionar les peces que surten del procés productiu d'una companyia automobilística per tal d'identificar si una mostra extreta és correcta o té algun defecte.

El propòsit principal que es vol assolir amb la introducció de la cèl·lula és la reducció del temps necessari per detectar un possible error en la fabricació de les peces. Tanmateix, també s'espera una optimització del procés productiu mitjançant la reducció del temps d'inspecció i la conseqüent reducció de costos.

El punt de partida és una cèl·lula d'inspecció dissenyada en un espai virtual pensada per complir les especificacions requerides pel client i posteriorment muntada en un taller. Aquesta cèl·lula conté tots els elements necessaris per extreure el núvol de punts que defineix la superfície de la peça que s'està inspeccionant, un sistema per ubicar la superfície extreta en un volum determinat i realitzar l'extracció de dades del núvol de punts comparant-les amb un model tridimensional de la peça que s'està mesurant.

Per fer tot aquest procés s'utilitza un capçal Sidio Airus per realitzar els digitalitzats, una càmera de fotogrametria per situar un seguit de referències en l'espai de treball, un software específic d'inspecció i una cèl·lula virtual dissenyada en RobotStudio per fer la planificació de la trajectòria del robot.

Finalment, es realitzen un seguit de proves per comprovar la bondat en la que treballa la cèl·lula d'inspecció. Aquestes proves consisteixen en obtenir mesures d'un artefacte certificat per comprovar l'exactitud de les mesures i realitzar un test de repetibilitat i reproductibilitat per comprovar la precisió del sistema i comprovar la repetibilitat de l'utilatge.

Índex

| | |
|-------------------------------------------------|----|
| Índex | 3 |
| Introducció | 5 |
| 1. Antecedents | 7 |
| 2. Tecnologia d'inspecció | 8 |
| 2.1. Capçal Sidio Airus | 10 |
| 2.2. Fotogrametria | 12 |
| 2.2.1. Càmera de fotogrametria | 13 |
| 2.2.2. Targets i codificats | 14 |
| 2.2.3. Barra d'escalat | 15 |
| 2.2.4. Software de fotogrametria | 16 |
| 3. Calibratge de la cèl·lula | 20 |
| 3.1. Calibratge de les unitats mecàniques | 20 |
| 3.2. Calibratge de la càmera | 23 |
| 3.3. Calibratge càmera fotogrametria | 26 |
| 4. Creació programes d'inspecció | 27 |
| 4.1. Arxiu de trajectòries | 27 |
| 4.1.1. Treball on-line | 29 |
| 4.1.2. Treball off-line | 31 |
| 4.1.3. Disseny de trajectòries | 33 |
| 4.1.4. Paràmetres de digitalitzat | 35 |
| 4.2. Software d'inspecció | 38 |
| 4.2.1. Alinear | 39 |
| 4.2.2. Mesurar | 41 |
| 4.2.3. Creació de l'informe | 45 |
| 4.3. Sidio Inspector | 47 |

| | | |
|------|---------------------------------|----|
| 5. | Test d'exactitud | 50 |
| 5.1. | L'artefacte a mesurar | 50 |
| 5.2. | Sistema de coordenades | 51 |
| 5.3. | Disseny de l'estructura..... | 52 |
| 5.4. | Mode d'operació | 54 |
| 5.5. | Resultats..... | 56 |
| 5.6. | Test VDI II..... | 57 |
| 6. | Test de precisió..... | 58 |
| 6.1. | Test de repetibilitat | 58 |
| 6.2. | Test de reproductibilitat | 59 |
| 6.3. | Conclusions test R&R..... | 59 |
| 7. | Planificació..... | 61 |
| 8. | Pressupost..... | 62 |
| 9. | Impacte ambiental..... | 63 |
| | Conclusions..... | 64 |
| | Bibliografia | 66 |
| | Annexos | 68 |
| A. | Resultats test exactitud..... | 68 |
| B. | Resultats test precisió..... | 69 |

Introducció

Aquest projecte s'ha desenvolupat durant una estada en pràctiques a l'empresa Asea Brown Boveri (ABB) de Sant Quirze del Vallés dins del departament de Visió i Metrologia (3DVM). El departament va crear-se a partir de l'adquisició de l'empresa NUB3D a principis de l'any 2017. Quan un client signa un contracte de compra d'una cèl·lula de metrologia a ABB, a part de tots els elements físics i mecànics també compra un seguit de programes d'inspecció ja realitzats per comprovar que el funcionament de tot el sistema és correcte.

El projecte neix de la necessitat d'una companyia sueca que fabrica peces de carrosseria de camió que vol incorporar una cèl·lula d'inspecció dins del seu procés productiu. Actualment aquesta empresa té tot el procés de control de qualitat externalitzat a una empresa que utilitza la tecnologia CMM (mesura de coordenades amb palpador) un cop s'ha finalitzat tot el lot de producció. L'objectiu de la companyia per incorporar aquesta cèl·lula de metrologia és reduir el temps necessari per inspeccionar cada peça, evitar el temps i costos del transport per enviar els lots a l'empresa d'inspecció i, en definitiva, minimitzar el temps que es pugui trigar en detectar un error del sistema productiu que invalidi les peces fabricades; reduint així costos.

El projecte s'ha desenvolupat com a treball de final de la doble titulació de màster. Aquest document és complementari al treball final de la titulació d'enginyeria industrial¹, on s'expliquen tots els passos seguits per escollir els diferents elements que componen el sistema i la seva distribució en l'espai de la cèl·lula. Els elements principals de la cèl·lula són un capçal de metrologia que utilitza la tecnologia de la llum blanca per digitalitzar les superfícies de les peces i un conjunt mecànic format per un manipulador de 6 eixos i una taula rotatòria que permeten ubicar la càmera en les posicions desitjades.

El treball actual abarca des del moment en que es munta la cèl·lula al taller d'ABB fins el moment en que aquesta està llesta per a ser empaquetada i transportada a casa del client. Abans però s'han de complir dos objectius principals:

El primer s'ha de realitzar pel contracte de venda i és el de crear els programes d'inspecció complets de 8 de les peces que es fabriquen en la companyia per crear un informe

1 Disseny d'una cèl·lula d'inspecció [1]

complet de les entitats desitjades. Aquesta tasca pot servir per mostrar als operaris el funcionament de la cèl·lula i els passos a seguir per crear els programes d'inspecció.

El segon objectiu d'aquest treball és poder certificar a l'empresa de destí que la cèl·lula d'inspecció funciona correctament assegurant la bondat de les mesures que s'extreuen. Per assolir aquest objectiu principal s'han de complir dos de secundaris. El primer és verificar que l'exactitud de l'extracció de les mesures (que les mesures preses siguin properes a la mesura real) i l'altre és certificar-ne la repetibilitat (que les mesures preses siguin properes entre elles).

Per realitzar aquests projecte, el client ha de proveir a ABB certa informació i arxius que, degut al contracte de confidencialitat signat per ABB, no es poden mostrar en aquest treball. Per aquest motiu, a l'hora d'exemplificar alguns passos en que es mostren núvols de punts i arxius tridimensionals no s'utilitzen les peces reals sinó que s'utilitzen peces de mostra creades per ABB.

1. Antecedents

Aquest treball és la continuació directa del projecte de disseny d'una cèl·lula de robòtica d'inspecció², realitzat pel mateix autor per la titulació del màster en enginyeria industrial. En aquell document s'exposen els diferents elements mecànics i físics que ha d'incorporar la cèl·lula robotitzada per satisfer les especificacions del client i també complir la normativa europea de seguretat i salut.

Els elements principals de la cèl·lula de metrologia són un capçal Sidio Airus que utilitza la tecnologia de la llum blanca per digitalitzar les superfícies de les peces i un conjunt mecànic format per un manipulador de 6 eixos i una taula rotatòria que permeten ubicar l'escàner en les posicions desitjades. També s'incorporen els elements necessaris per satisfer les especificacions de seguretat marcades en les directives europees de seguretat, principalment la 2006/42/CE relativa a maquinaria i totes les normes ISO que allà s'hi refereixen (ISO 10218, ISO 12100 etc.).

Un cop triats els diferents elements es dissenya la distribució en planta i, després d'assegurar que es compleixen amb les normes de seguretat, es dissenya la cèl·lula en un entorn tridimensional. Aquest entorn es crea a partir d'elements mecànics de la llibreria d'ABB. Aquests models tridimensionals contenen el model físic del robot i permeten realitzar la simulació de les trajectòries del robot.

Un cop es valida el disseny s'envien tots els elements al taller d'ABB de Sant Quirze del Vallès i es munta la cèl·lula. Un cop s'ha verificat que tots els sistemes funcionen correctament, especialment els de seguretat, es pot començar a treballar en l'etapa de programació i de verificació de l'equip de mesura.

2 Disseny d'una cèl·lula d'inspecció [1]

2. Tecnologia d'inspecció

L'escàner de la cèl·lula és un sensor que treballa amb la tecnologia de llum. Els grans avantatges³ que ofereix aquesta tecnologia respecte altres mètodes d'escaneig és la rapidesa i qualitat de l'extracció de mesures i la gran flexibilitat que ofereix disposar d'un únic sistema que pot realitzar inspeccions en volums de mesura molt diversos.

Aquesta tècnica⁴ consisteix en la projecció utilitzant un focus de llum blanca d'un patró compost per diverses línies de llum i ombra paral·leles que, si s'observen des de punts de vistes diferents a la del projector, es veuen distorsionades. El procés de digitalitzat utilitza la conjunció de la tecnologia òptica i el processament digital d'aquestes imatges per extreure les coordenades de tots els punts situats a la superfície d'un objecte.

La imatge captada per la càmera, al situar-se en un angle diferent, mostra la deformació geomètrica de les bandes de llum que es projecten sobre la superfície de la peça que s'està digitalitzant (veure fig 1). El fet de tenir un patró amb diverses línies permet obtenir simultàniament multitud de mostres. La distorsió i el desplaçament de les línies observat permet obtenir una recuperació exacta de les coordenades 3D de qualsevol detall sobre la superfície de l'objecte mitjançant tècniques de triangulació. Així doncs, aquesta tecnologia permet obtenir un núvol de punts d'alta densitat amb precisions de desenes de micròmetres en molt poc temps.

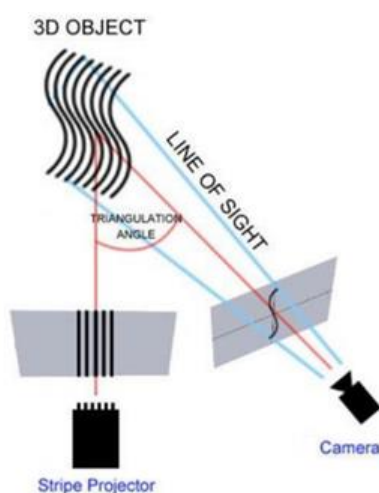


Fig. 1. Esquema captació de dades amb la tècnica de llum. Font: Structured Light 3D Scanning

³ White light 3D scanning [2]

⁴ Structured Light 3D scanning [3]

Per obtenir informació de la superfície, el procés de digitalitzat està compost per la captura de dues imatges. En la primera es genera un patró de baixa freqüència, és a dir, amb bandes lumíniques i fosques que sobre una superfície plana mesuren gairebé un centímetre. Acte seguit es projecta un patró de més alta freqüència amb bandes que mesuren poc més d'un mil·límetre de gruix. Les bandes de baixa freqüència són susceptibles a errors degut a reflexes de la llum en superfícies còncaues (imatge esquerra figura 2). Les bandes d'alta freqüència són molt susceptibles de difuminar-se en cossos que no reflecteixen tota la llum o a causa de la llum difusa de l'ambient introduint molt soroll (el terra de la imatge de la dreta de la figura 2). La unió del resultat de les dues imatges permet extreure un núvol de punts superficial correcte.

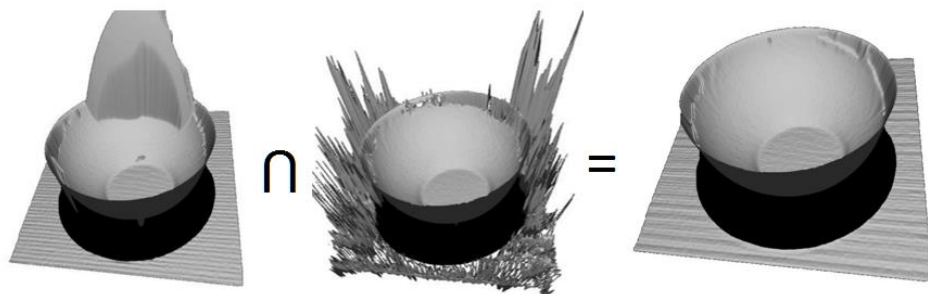


Fig. 2. Esquema del procés de càlcul del núvol de punts. Font: Structured Light 3D Scanning

En la figura 2 es mostra el procés dut a terme en el càlcul de la superfície d'un bol fent la intersecció d'una imatge que només conté una línia de llum i una de foscor i una imatge que conté el patró tant fi que no veu correctament els punts de la taula. Aquest és un cas extrem que no es dona en els escàners de metrologia comercials però que serveix per il·lustrar el càlcul que realitza per extreure els resultats.

Els escàners industrials que s'utilitzen en processos d'inspecció i metrologia tenen les línies gruixudes força més fines que en l'exemple anterior i les primes són més amples, cosa que porta a uns resultats de més qualitat que els exposats en la imatge anterior. L'escàner que s'utilitza en aquest projecte és el Sidio Airus d'ABB.

2.1. Capçal Sidio Airus

El Sidio Airus⁵ és un capçal capaç de digitalitzar qualsevol superfície que hi hagi dins del volum de mesura. Està format per un projector i una única càmera situats a un angle determinat entre ells. Com més angle hi hagi de diferència entre el projector i la càmera millor serà la triangulació i per tant s'obtingran resultats més precisos. L'inconvenient d'augmentar molt l'angle és que cada cop s'obtenen més zones a l'ombra i es perd informació com podria ser la profunditat dels forats. L'angle que té el Sidio Airus és de 30 graus, un valor que permet obtenir molt bons resultats sense perdre gaire la vista de les superfícies il·luminades. El volum de mesura és un paral·lelepípede definit per la intersecció entre els rajos del projector i el rang de visió de la càmera.

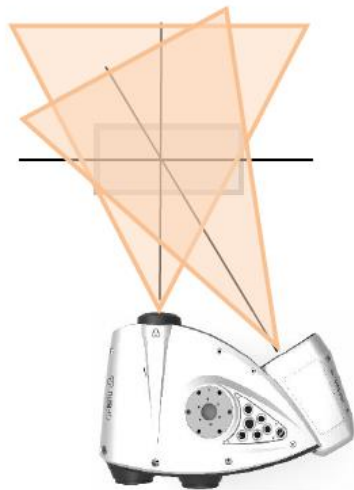


Fig 2. Esquema del capçal Sidio airus amb el volum de treball corresponent.

És imprescindible que durant el procés de digitalitzat no hi hagi un moviment relatiu entre la càmera i la superfície que es vol mesurar. Un desplaçament o vibració, per petita que fos, introduiria en el digitalitzat un error que podria resultar molt significatiu i es perdria així la precisió que s'espera d'aquesta tècnica.

L'únic element de tot el procés de digitalitzat és la llum, per aquest motiu és important que s'intenti evitar el màxim possible l'entrada en el sistema de rajos lumínics emesos per altres fonts. Els llums que es situen habitualment a les fàbriques i indústries no solen ser perjudicials pel sistema de mesura però els rajos solars i llums blancs més potents com podrien ser llums de

⁵ *FlexInspect user manual*[4]

laboratori podrien dificultar i fins i tot impedir l'obtenció de resultats ja que la càmera podria no detectar el patró amb prou nitidesa.

El fet que l'únic element que apareix en tot el procés de digitalitzat sigui la llum emesa pel projector permet obtenir núvols de tanta densitat com resolució tingui la càmera. En el cas del Sidio Airus es disposa d'una càmera de 5 megapíxels que observa una superfície de 550x390 mm. Això ofereix una densitat de punts de 23 píxels per mil·límetre quadrat. Així doncs aquesta tecnologia permet obtenir núvols d'alta densitat de punts tridimensionals i un alt nivell de precisió en pocs segons.

Degut a la gran diversitat de superfícies existents i de necessitats de la inspecció, hi ha certs paràmetres de digitalitzat que es poden modificar per tal de millorar els resultats que s'obtenen. Aquests paràmetres envien informació al capçal per modificar certs aspectes de la imatge projectada pel focus, de la càmera o del post-processament de les imatges. Al ser paràmetres es poden modificar per a cada vista per tal d'adaptar el màxim la mesura a la superfície visible en cada captura i poden ser diferents d'un digitalitzat a un altre.

El Sidio ofereix moltes possibilitats tot i que els paràmetres principals que es poden modificar són el temps d'exposició o temps d'obertura de l'obturador de la càmera, l'extracció de contorns utilitzant un patró en el projector totalment blanc i aplicant l'operador de Canny, el mode de digitalitzat que permet regular la grandària de les línies dels patrons per extreure els punts amb més precisió, un filtre per processar les dades extretes i eliminar el soroll i una opció que permet treballar amb menys píxels cosa que ens elimina informació però augmenta la rapidesa dels resultats.

Gràcies a la possibilitat de realitzar digitalitzats amb diferents exposicions es poden extreure núvols de punts de gairebé qualsevol objecte, des de superfícies negres a superfícies metàl·liques brillants. El que sí que s'ha de tenir en compte és que per obtenir bons resultats l'objecte que s'està mesurant ha de ser el més opac possible. Objectes transparents, translúcids o polits com un mirall poden no oferir un bon resultat ja que el patró observat per la càmera pot no existir, no ser prou nítid o tenir molt soroll. En cas d'haver de mesurar aquest tipus d'objectes es recomana cobrir la superfície problemàtica amb un esprai d'una pintura especial que és molt líquida i opaca i que permet obtenir digitalitzats correctes de la superfície a mesurar.

Normalment s'han de fer diversos digitalitzats o captures d'una sola peça per extreure tota la informació requerida per realitzar el procés d'inspecció. Això és degut al fet que en una

sola imatge no acostuma a aparèixer tota la peça i normalment hi ha entitats que s'han de mesurar en vistes diferents. Per aquest motiu es requereix ubicar el núvol de punts que s'extreu al realitzar el digitalitzat en l'espai.

Per a fer això s'utilitza una tècnica anomenada fotogrametria⁶. Aquesta tecnologia capta diverses referències situades físicament en el volum de treball i en calcula les distàncies i angles entre els punts trobats. Quan es realitza un digitalitzat la càmera capta també aquestes referències i utilitza els càlculs de posició i angles realitzats en la fotogrametria per trobar la posició en l'espai que ha d'ocupar la càmera que minimitzi l'error trobat, situant així la càmera en un punt i orientació de l'espai i, a partir d'aquesta referència, s'ubica tot el núvol de punts en el volum de treball.

2.2. Fotogrametria

La fotografia és el procés en el qual es converteix un món de 3 dimensions en una imatge plana de 2 dimensions. La fotogrametria consisteix en realitzar el procés invers, és a dir, obtenir un espai tridimensional a partir d'imatges de 2 dimensions. Com al realitzar una fotografia es perd informació (principalment la profunditat), el procés invers requerirà més d'una imatge per obtenir un mapa complet.

La fotogrametria és una tècnica de mesura de coordenades 3D molt precisa, versàtil i relativament ràpida que s'utilitza per calibrar tot el volum de treball en certes aplicacions de metrologia. Aquest procés de calibratge consisteix en prendre imatges dels espais d'interès des de diferents posicions i angles de la càmera. Per aconseguir això a l'hora d'escriure els punts de la trajectòria del programa s'acostumen a agafar unes poques orientacions i posicions del robot molt diferents i es fa girar la taula rotatòria per aconseguir aquestes diferents vistes. A partir d'aquestes imatges, on es poden observar les mateixes referències, es poden desenvolupar les línies del camp de visió des de la càmera a l'objecte i mitjançant triangulació ubicar aquestes referències a l'espai.

Les fotogrametries que es realitzen en la cèl·lula d'aquest projecte es fan amb el hardware i software d'una empresa especialitzada en sistemes de fotogrametria anomenada Geodetic Systems. Segons els tests d'acceptació⁷ realitzats per aquesta empresa, les càmeres

⁶ *What is photogrammetry [5]*

⁷ *Acceptance test results [6]*

que produeixen són capaces de realitzar fotogrametries d'espais de grans dimensions amb errors menors al mil·límetre. Per a fer aquestes fotogrametries els elements necessaris són els següents:

2.2.1. Càmera de fotogrametria.

En aquest projecte s'utilitza el model Dynamo/D5⁸. És una càmera especial amb una resolució de 5 Megapíxels que captura imatges en blanc i negre de l'espai que es vol mapejar. La càmera està situada sobre el capçal del robot (veure fig. 3) per tal de poder automatitzar el procés de fotogrametria. Aquest dispositiu és capaç de prendre 10 captures per segon i té una precisió de 14 micres de base més 14 micres per metre de distància a la superfície.



Fig 3. Imatge de la càmera de fotogrametria situada sobre el Sidio Airus

Per tal de poder observar el màxim d'informació en cada captura, té una lent que li dona un lleuger efecte d'ull de peix per ampliar el camp de visió. La càmera té un arxiu propi de calibratge proveït per l'empresa fabricant que s'utilitza per corregir aquest efecte un cop capturades les imatges i ubicar amb precisió totes les referències.

Abans de començar a treballar s'ha d'assegurar que la lent per enfocar les imatges estigui en una posició que doni una imatge nítida a la distància a la que es fan les captures. També s'ha d'ajustar el temps de l'obertura de l'obturador de la càmera tot i que el software que incorpora la càmera permet realitzar aquest procés de forma automàtica realitzant algunes

fotografies contra una superfície frontal plana. Segons la brillantor captada, el temps d'obertura s'incrementa o es redueix fins que la fotografia entra en els paràmetres desitjats.

Com l'obertura de l'obturador és molt ràpida gràcies a la potència del flaix, el sistema permet realitzar la fotogrametria en moviment, és a dir que es poden capturar imatges durant el procés de rotació de la taula o el transcurs de la trajectòria del robot. Tot i que per motius de seguretat i precisió la rutina de capturar imatges espera a que el robot estigui aturat, el fet que hi pugui haver vibracions en el sistema no hauria de comportar una pèrdua en la precisió de les mesures si totes les referències es mantenen en la mateixa posició relativa.

2.2.2. Targets i codificats.

Els targets o referències són uns gomets circulars que tenen una corona negra i al centre un cercle de color blanc lleugerament descentrat (veure fig. 4). Aquestes referències estan fabricades amb molta precisió de manera que sabent els píxels de l'eix primari i el secundari de l'el·lipse que es veu a la imatge la càmera és capaç de determinar la distància i orientació a la que es troben entre ells. Aquests targets han de posar-se en els utilatges i estructures que es mantenen en totes les mesures per poder situar el núvol de punts en el volum de treball. No s'ha de posar referències sobre la peça que es vol mesurar ja que s'hauria de realitzar una fotogrametria per cada peça i augmentaria molt el temps de cicle. En cas que a l'hora de buscar les vistes per realitzar els digitalitzats hi hagi volums en els que no apareguin prou targets ni espai per col·locar-los s'hauria de fabricar una estructura només per situar aquestes referències i tornar a realitzar una fotogrametria.

Els codificats són una imatge rectangular en les que hi ha dibuixat un patró de 3 files i 3 columnes amb 8 rodones blanques sobre fons negre i un espai buit (veure fig. 5). La distribució de les rodones dins del seu espai a cada patró és única i diferenciada dels altres, permetent obtenir el número que identifica cada un dels codificats. Els codificats són necessaris per situar punts en comú entre totes les imatges per poder alinear-les respecte el mateix sistema de coordenades i empalmar-les a l'hora d'extreure les posicions de les referències. Un cop realitzada la fotogrametria es poden treure aquests codificats ja que l'escàner només és capaç de situar referències. Igual que les referències, s'han de posar codificats en totes les direccions i orientacions possibles per tal que en cada imatge n'hi hagi suficients per després poder unir els espais.



Fig 4. Referències de fotogrametria



Fig. 5. Codificats de fotogrametria

2.2.3. Barra d'escalat.

La fotogrametria és per definició una tècnica de mapejat en 3D adimensional. Només troba amb exactitud els angles entre referències però sense una referència de longitud vàlida les dimensions són proporcionals a una base indeterminada. Per poder de situar els targets a les distàncies reals es requereix una referència coneguda.

La barra d'escalat és una vara d'aproximadament un metre de llargada que se situa habitualment solidària al costat de la taula i que permet escalar correctament les distàncies entre referències. Les barres són tubs cilíndrics de materials resistents per evitar deformacions que puguin espatllar la mesura. En el tub s'afegeixen uns suports imantats que serveixen per col·locar la barra en un sortint de la taula i evitar el moviment. En cada un dels extrems de la barra hi ha 1 codificat que no poden aparèixer a cap altre lloc de la fotogrametria i 4 targets (veure fig. 6). Cada barra també té un arxiu de calibratge que dóna informació de les distàncies amb precisions micromètriques entre cada parella de targets. Això permet situar aquestes distàncies en les imatges en que apareix la barra i es pot escalar mitjançant tècniques de triangulació aquestes distàncies a totes les referències del volum trobat.



Fig 6. Barra d'escalat

És important que la barra d'escalat aparegui en una bona part de les imatges que s'utilitzen en la fotogrametria ja que permet fer el procés de triangulació des de diferents perspectives. Això ajuda a minimitzar l'error en els càlculs de distància i una millor precisió del volum de treball (veure fig. 7, pàgina 18).

2.2.4. Software de fotogrametria

Per a realitzar una fotogrametria de forma correcta, és necessari que les fotografies que es prenguin tinguin algunes característiques⁹. Per començar, com s'ha comentat abans, les imatges s'han d'agafar de diferents posicions i angles de la càmera. Com més diferència hi hagi entre els angles d'incidència de la càmera millor serà el resultat de la triangulació i menor serà l'error final trobat (es recomana que totes les referències es vegin com a mínim en dues captures diferents amb angles entre 60 ° i 120°). També interessa que totes tinguin un bon nombre i distribució de referències i codificats al llarg de la fotografia, és a dir, no realitzar una captura en un lloc on tota la informació estigui en una meitat de la imatge i que a l'altra no hi hagi cap referència.

Si la imatge té menys de 2 codificats es classifica com a dolenta i s'elimina del càlcul de la fotogrametria, si té menys de 4 codificats o 12 referències aquesta es classifica com a dèbil. Les imatges dèbils entren dins del càlcul de la fotogrametria però degut als pocs codificats i referències és més difícil posicionar-les en l'espai correctament i acostumen a afegir soroll, empitjorant el càlcul de les posicions de les referències que s'hi observen.

També s'acostuma a ampliar el número mínim de vistes en les que ha de sortir una referència per tenir-la en compte, tot i que el mínim de fotografies que es requereixen per ubicar un punt és 2, s'acostuma a doblar aquest número per assegurar una millor triangulació i reduir el possible efecte del soroll.

Assegurar que els targets estan bé no només de dimensió sinó que no estan estripats o desgastats, enganxats en una cantonada o corba pronunciada. Tot i que és impossible clavar al micròmetre una sanefa manualment, s'ha de procurar que els targets estiguin col·locats de manera aleatòria ja que una sèrie repetitiva podria donar problemes a l'hora de situar els punts quan es digitalitza una superfície.. Una altra situació a evitar és la de col·locar els targets en una línia recta ja que els càlculs es fan per triangulació i un triangle format per tres punts situats en una recta implicarien angles de gairebé 180° i 0°, cosa que donaria mals valors a la triangulació i l'error mitjà trobat en les imatges en que aparegués podria disparar-se.

⁹ *What is photogrammetry [5] Planning summary and checklist*

Per assegurar-se que un reflex o un element extern del volum que es vol calibrar no aparegui com a referència a la fotogrametria es poden modificar certes opcions per tal de depurar el màxim possibles errors que es puguin trobar. Modificant el número mínim i màxim de píxels que poden formar un target assurem que un reflex no surti com a referència. Reduint el valor del “treshold” a l’hora de fer la operació de binarització de la imatge es poden augmentar les possibles àrees que es poden qualificar com a referències ja que a mesura que es va rotant el target respecte la càmera es va reduint la brillantor que en capta la càmera.

També s’acostuma a ampliar el número mínim de vistes en les que ha de sortir una referència per tenir-la en compte. Tot i que el mínim de fotografies que es requereixen per ubicar un punt és 2, s’acostuma a doblar aquest número per assegurar una millor triangulació i reduir el possible efecte del soroll. Si apareix soroll només es tindrà en compte si surt en la mateixa posició en més de 4 imatges, cosa força improbable.

Un cop capturades les imatges, aquestes passen a una unitat especial de càlcul de fotogrametries que, mitjançant un software específic triangula les posicions dels targets en l’espai 3D agafant com a referències les posicions i orientacions dels codificats per fusionar les imatges en l’espai tridimensional i ubicar-hi totes les referències. Aquest procés troba els angles que formen les referències entre sí però les longituds es calculen utilitzant com a referència un valor indeterminat.

Per fer el càlcul de les longituds el programa busca les referències que hi ha situades en la línia recta que uneix el centre dels dos codificats de la barra d’escalat i modifica les longituds amb un multiplicador per minimitzar el RMS¹⁰ o la variància. La fórmula del càlcul que es realitza es la següent:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Li - k \cdot li)^2}{N}}$$

Eq. 1 Càlcul del RMS o variància

On Li és la distància real segons el document de la barra d’escalat, li és la distància trobada en el procés de fotogrametria amb una referència indeterminada i k és el valor d’escala

¹⁰ Root-Mean Square o Error quadràtic mitjà.

pel que s'ha de multiplicar totes les longituds per obtenir les distàncies entre referències reals. Si es vol optimitzar el RMS s'ha de minimitzar el numerador. El valor òptim de k és:

$$k^* = \frac{\sum_{i=1}^N (Li \cdot li)}{\sum_{i=1}^N li^2}$$

Eq. 2 Solució analítica del valor òptim de k

Un cop realitzat tot el càlcul, el programa mostra per pantalla uns resultats com els que es mostren en la figura 7.

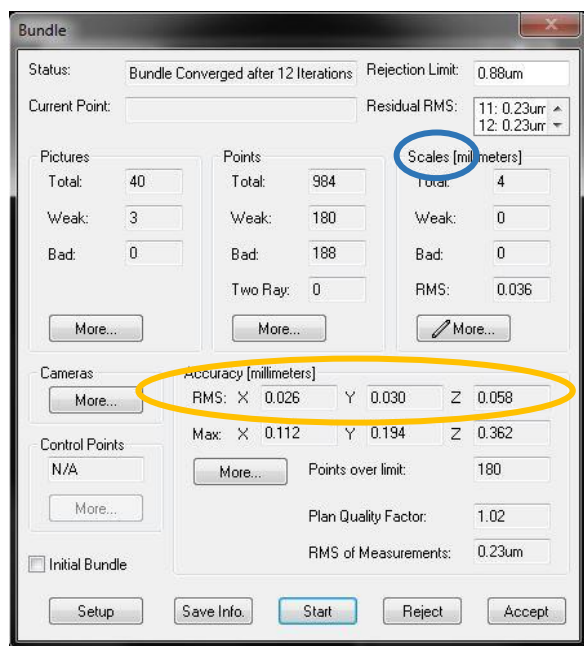


Fig 7. Resultat d'una fotogrametria

Per saber si la fotogrametria és bona el primer pas és comprovar que després del procés de càlcul s'han trobat els 4 valors de les distàncies de la barra d'escalat sense cap distància dèbil ni dolenta i amb un RMS a les 50 micres (veure marca blava de la Fig 7).

Això permet assegurar que les distàncies entre punts en tot el volum observat és correcte. Si la barra no dona bons resultats el més probable és que no aparegui en suficients fotografies o des d'orientacions suficientment diferenciades, així que s'haurien d'afegir vistes a la trajectòria de la fotogrametria amb captures en les que aparegués tota la barra.

Els altres valors que interessen són els RMS de les posicions de les referències en les direccions dels tres eixos, podent ser aquest valor com a màxim de 50 micres en cada direcció (veure taronja de la Fig 6). En cas que es superin aquests valors l'explicació més raonable és

que algun conjunt d'imatges té vistes poc diferenciades, les captures en les que surten tenen pocs codificats o s'han pres com a bones algunes referències amb errors molt elevats degut al soroll. Si es deshabiliten els punts dèbils i dolents que són els que tenen un error més elevat es redueix el valor de l'error però en futures fotogrametries aquests punts conflictius poden tornar a aparèixer. Per això es recomana trobar la font de l'error, corregir-lo (afegir o canviar vistes, canviar el programa per incloure més restriccions etc.) i realitzar una altra fotogrametria. Si l'operació es realitza correctament el núvol de punts de les referències pot exportar-se a un arxiu de text que conté la posició de tots els targets i codificats.

Si els resultats són correctes, es guarda la trajectòria programada a l'arxiu corresponent a la carpeta de fotogrametria i com a plantilla de mesura els paràmetres modificats al software de fotogrametria amb els arxius de calibratge de la càmera i de la barra d'escalat. Quan es cridi el programa de la fotogrametria, el robot anirà a les posicions guardades de la trajectòria i carregarà les imatges que vagi capturant en la plantilla de mesura. Quan la trajectòria finalitzi, es calcularà la posició de tots els elements trobats i actualitzarà automàticament l'arxiu .xyz de la carpeta de fotogrametria.

3. Calibratge de la cèl·lula

Els elements principals¹¹ que componen la cèl·lula d'inspecció són el robot, el capçal, el controlador, una taula rotatòria i tot un conjunt de mesures de seguretat. Un cop s'ha realitzat tot el procés d'assemblatge de la cèl·lula, les connexions i després de comprovar que les mesures de seguretat que s'hi han instal·lat funcionen correctament, s'han de seguir un conjunt de passos que permeten preparar la cèl·lula per a poder començar a treballar. El primer pas que s'ha de fer és el d'instal·lar en l'ordinador del controlador el sistema operatiu.

Per crear aquest sistema operatiu es necessita l'última versió del software RobotWare i de l'AddIn de Sidio Airus que inclou totes les senyals i configuracions necessàries per treballar amb un capçal de Sidio. També es requereix un arxiu de llicència per la unitat mecànica que es vol utilitzar que incorpori totes les opcions addicionals de pagament que es desitgen instal·lar. En aquest cas s'ha d'afegir l'opció del PC Interface, la del SafeMove 2 i la de multitasca.

Quan el sistema operatiu està creat, el següent pas és realitzar els calibratges necessaris per a posar a punt la cèl·lula. Aquest procés és important per assegurar el correcte funcionament de tots els elements del sistema. Un procediment erroni en les unitats mecàniques pot arribar a comportar col·lisions o configuracions perilloses per la maquinària i portar a l'obtenció de resultats erronis o irrellevants. Un calibratge erroni de la càmera pot implicar l'acceptació de resultats erronis o el rebuig de resultats correctes.

3.1. Calibratge de les unitats mecàniques

Després de crear el sistema operatiu no es pot ni executar un programa ni moure el robot ja que les unitats mecàniques no estan calibrades. Per a fer el calibratge del robot s'ha de tenir en compte que els sensors de posició que s'incorporen en els motors són resòlvers. Aquesta tecnologia permet obtenir amb una resolució molt bona l'orientació exacta en la que es troba l'eix del motor però l'inconvenient principal dels resòlvers és que no pot distingir entre una posició i la mateixa sumant-li una volta. En el cas que el motor no arribés en cap cas a realitzar una volta no hi hauria cap problema però un altre aspecte a considerar és el pes que pot haver de suportar la unitat mecànica (propi i càrrega nominal).

¹¹ Disseny d'una cèl·lula d'inspecció [1]

Si es volguessin incorporar motors capaços de realitzar aquest parell, les dimensions del robot serien enormes i es consumiria una gran quantitat d'electricitat. Per aquest motiu els motors incorporen un mecanisme reductor format per engranatges que els permet haver de realitzar menys parell per suportar una càrrega determinada però com a contrapartida el motor ha de donar més voltes perquè l'eix faci un moviment concret. Aquesta reducció pot arribar a tenir valors que rondin el 1:200 en alguns eixos del robot, on una volta completa del motor fa girar l'eix en qüestió uns 2°.

El fet que els motors hagin de donar moltes voltes per realitzar els moviments de la unitat mecànica obliga a incorporar un sistema per mesurar correctament aquests moviments. Per això tots els eixos incorporen un comptador que s'incrementa o es disminueix cada cop que el robot passa pel zero del motor. El zero o origen del motor es calcula amb uns dispositius molt precisos en el moment del muntatge del robot i s'inclou l'angle exacte en una etiqueta que s'enganxa en la part posterior de la unitat mecànica. Aquests valors no canvien mai a no ser que es modifiqui l'estructura mecànica interna dels motors. En el cas que s'hagués de fer alguna reparació o substitució de motor s'hauria de tornar a realitzar el calibratge dels zeros del motor i actualitzar l'etiqueta. Aquest procés s'anomena calibratge fi i només pot fer-se amb dispositius especialitzats.

Un cop els valors del calibratge fi coincideixin només es podran realitzar moviments eix a eix perquè el comptador de revolucions no té un valor actualitzat i per tant el robot només pot saber en quina posició està el motor però no és capaç de saber l'angle de cada un dels seus eixos. Per actualitzar aquest valor s'ha de posar el robot a marques, acció que consisteix en moure la unitat mecànica eix a eix fins que tots estiguin en la posició de 0 graus (veure fig. 8). Per fer aquest procés, en tots els eixos hi ha una marca en la part estàtica i una en la part dinàmica que s'ha de fer coincidir. Quan totes les marques coincideixen s'actualitza des de la unitat de programació el comptador de revolucions, fet que ens permet situar la referència dels 0 dels eixos. Un cop realitzada aquesta acció el robot ja pot saber els valors exactes de cada eix i per tant ja permetrà realitzar moviments lineals, reorientacions i executar línies de programa.



Fig 8. Marques de referència en part fixa i mòbil per actualitzar revolucions

Un cop s'ha calibrat la unitat mecànica, el següent pas és el de calibrar la taula amb un procediment molt similar. Aquest element té unes marques idèntiques a les del robot però, degut a la seva simetria, permeten una actualització a 0° i 180° . El motor no té cap limitació de moviment així que en principi no hi hauria cap problema. L'únic inconvenient que es pot trobar és que la taula realment no és completament simètrica ja que en una banda s'hi col·loca la barra d'escalat, cosa que s'intenta situar al costat oposat al de realitzar la càrrega i descàrrega i situar la taula a 180 graus pot fer-la descobrir i posar-la en perill durant aquest procés.

El calibratge de les unitats mecàniques no s'ha de fer cada cop que s'encén el robot ja que el valor dels comptadors queden guardats a la memòria però sí que s'ha de fer després de muntar la cèl·lula, quan fa molt temps que no s'utilitza i s'ha perdut la memòria, al moure-la i si hi ha algun error de sistema que obligui a reiniciar el controlador en unes condicions estranyes.

Un cop realitzat el procés de calibratge de les unitats mecàniques, el següent pas és el d'agafar un punt de *Home* o repòs i un punt de manteniment. El primer punt de *Home* no pot ser el mateix que el de les marques ja que aquest últim és un punt singular i els moviments al seu voltant poden donar problemes. Habitualment s'agafa el punt de *Home* (veure fig 9) en una posició en la que la majoria dels eixos del robot estiguin desplaçats del 0 i en aquesta ocasió a més ha de ser un punt que estigui lluny de la superfície de restricció de moviment que ofereix el Software del SafeMove 2. A part la cèl·lula està pensada per ser en un futur una cèl·lula ampliada així que s'ha optat per situar el punt *Home* a la zona que quedarà entre les dues taules per trigar el mateix temps en arribar a la zona d'inspecció per una banda i per l'altra.

El punt de manteniment s'ha de situar proper a la zona d'entrada de la cèl·lula, que situï el capçal del robot a una alçada prou bona per a fer les accions de manera còmode però evitant en la mesura del possible obstaculitzar el pas dels operaris (veure fig. 10).

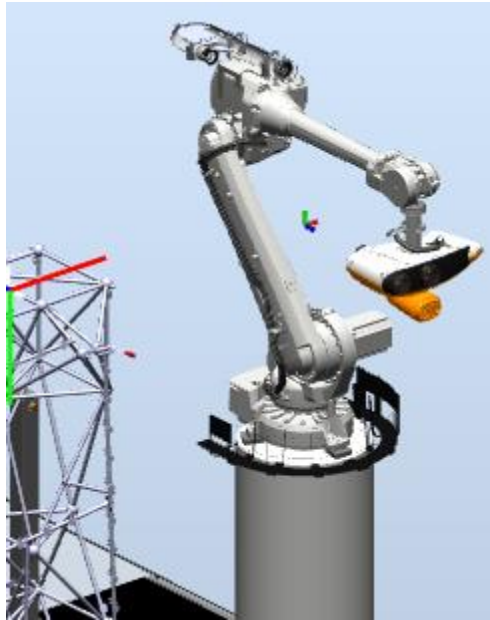


Fig. 9 Robot en posició de Home

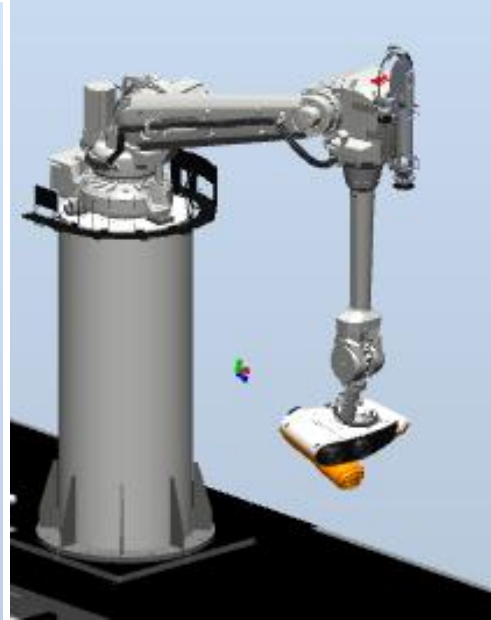


Fig. 10. Robot en posició de manteniment

3.2. Calibratge de la càmera

Com tots els equips de mesura és important assegurar que el capçal es manté calibrat i que es realitzen periòdicament processos de re-calibratge per mantenir la qualitat de les mesures que es fan al llarg del temps.

Per a realitzar el primer calibratge s'ha de situar el robot de forma frontal a la placa de calibratge de la càmera. Aquesta placa és una superfície llisa de 550 x 390 mm situada sobre una guia i que conté diversos patrons d'una corona circular situats al llarg de 13 files i 17 columnes. Quan el capçal s'engega, el projector emet dues línies gruixudes verticals i una fina horitzontal que determina una creu en el centre que ha de projectar-se a la corona central de la placa. El capçal ha de situar-se de tal manera que el projector emet la llum sobre la placa de manera frontal i que les línies rectes del patró emès siguin verticals o horitzontals respecte la placa de calibratge.

Un cop situat el projector en la posició i orientació desitjada, el següent pas és regular l'objectiu per aconseguir una imatge nítida. Posteriorment es modifica la posició del diafragma

per regula la quantitat de llum que entra a la càmera. Per fer això s'utilitza un programa anomenat Triple¹² desenvolupat per Nub3D que permet connectar-se a la càmera i realitzar certes accions. Durant aquest procés la càmera no mostra la imatge que observa sinó l'equivalència en color de la quantitat de llum que rep.

| Color | Equivalència |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Blau | Baixa il·luminació. no hi haurà digitalització en aquesta àrea |
| Verd | Nivell d'il·luminació adequat. Es digitalitzarà la superfície dins del volum de mesura |
| Groc | Nivell d'il·luminació elevat. Es digitalitzarà la superfície dins del volum de mesura |
| Vermell | Il·luminació excessiva. no hi haurà digitalització en aquesta àrea |

Taula 1. Equivalència del color de la imatge amb la quantitat de llum

Per regular la quantitat de llum que entra a la càmera es modifica de forma manual l'obertura del diafragma de la càmera que funciona com l'iris humà. Com més obert més fotons poden entrar per segon i per tant es veurà la imatge més clara, com més tancat es permet el pas a menys fotons i la imatge s'enfosqueix. L'obertura idònia de l'iris és la que permet observar la placa amb un nivell correcte o una mica elevat, evitant zones en les que per poca llum o per excessiva no es realitzarà cap digitalitzat, com es veu en la figura 11.

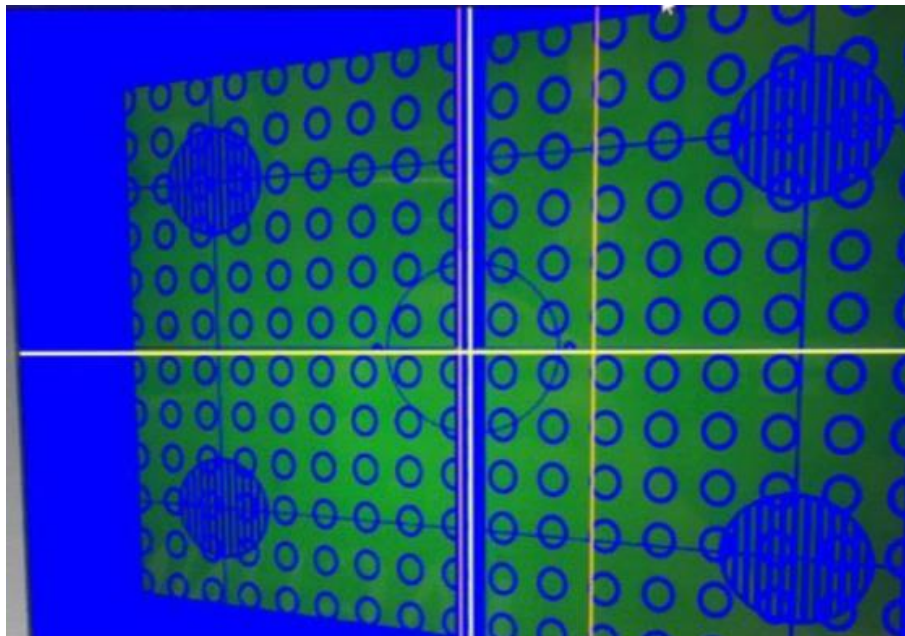


Fig 11. Placa de calibratge vista des de la càmera amb l'obertura de l'iris correcta

¹² *FlexInspect user manual*[4]

Després de la regulació de l'iris, es fa el procés de calibratge en sí. Aquest procés està automatitzat i consisteix en realitzar digitalitzats amb la mínima exposició de la placa de calibratge al llarg d'onze profunditats diferents (de 0 a 200 en passos de 20 mm). Al fer els digitalitzats, compara les referències de les corones circulars que troba amb les referències situades en un arxiu de calibratge. Un cop s'ha acabat el procés modifica els paràmetres interns de la configuració del Sidio (angle entre càmera i projector i posicionament relatiu) fins a minimitzar l'error trobat entre les referències trobades en tots els digitalitzats i els valors de l'arxiu de calibratge fins a trobar els valors que minimitzen l'RMS (veure equacions 1 i 2 de l'apartat 2.2.4). Un cop realitzat aquest procés es mostra per pantalla aquest valor que, per ser correcte, ha de ser menor als 40 micròmetres.

Un cop assegurat que el calibratge és correcte, es guarda el punt del robot com a punt de calibratge en la unitat de programació i es genera una trajectòria per anar des del punt *Home* fins a aquest punt i tornar. Aquesta trajectòria es guarda com un modul de programa en una carpeta de l'ordinador que conté tots els arxius necessaris pel calibratge. Això permet automatitzar tot el procés de calibratge.

Es recomana fer un re-calibratge de la càmera a l'inicialitzar la cèl·lula després de deixar un temps d'escalfament pel projector, si s'ha canviat la làmpada o si el capçal ha sofert algun accident o cop important. Quan es fa el calibratge de forma automàtica a part de mostrar el valor de l'error trobat també mostra l'historial dels valors dels últims calibratges.

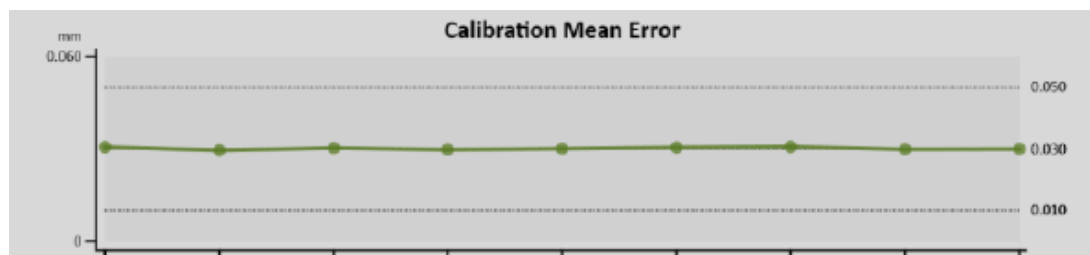


Fig. 12. Evolució dels errors mitjans trobats en el procés de calibratge

En la figura 12 es mostra l'historial de valors de la desviació trobada en els càlculs de l'error al llarg del temps tot i que el rang d'aquest valor en les últimes mesures ha estat de 30 a 31 micròmetres així que costa apreciar la diferència en un gràfic. Això permet concloure que la precisió del capçal no ha empitjorat respecte anteriors mesures. Si s'observés un augment significatiu de l'error podria significar que algun dels components físics del capçal s'ha mogut i s'hauria de reparar.

Es recomana fer un procés de calibratge setmanal per assegurar el correcte funcionament de la cèl·lula. El projector té una vida útil d'unes 3000 hores ja que poc a poc va perdent lluminositat i a partir d'aquest valor els resultats no estan garantits. Es recomana també un ajustament de l'obertura del diafragma cada 500 hores de treball.

3.3. Calibratge càmera fotogrametria

L'últim element a calibrar és la càmera de fotogrametria. Es situa la càmera de forma perpendicular a la taula a una distància en que es vegi tota i, després de regular l'objectiu per tenir imatges nítides, s'executa un procediment automàtic. Aquest procés que incorpora el sistema de fotogrametria realitza un seguit de càlculs de forma iterativa en que s'emet un flash, es captura la imatge amb la càmera i es regula automàticament l'obertura del diafragma depenent de la quantitat de llum que ha entrat fins que aquest valor entra dins dels límits establerts pel fabricant.

4. Creació programes d'inspecció

Un cop es tenen tots els elements de la cèl·lula funcionant, s'han de crear a l'ordinador els diferents programes d'inspecció. Per cada programa es requereixen diversos arxius així que es crea una carpeta amb el número corresponent que els conté. Els arxius principals que contenen tots els programes d'inspecció són un mòdul de RAPID (llenguatge de programació dels robots ABB) que conté la rutina de la trajectòria del robot i un arxiu de plantilla de Polyworks que conté totes les accions que s'han de realitzar sobre el núvol de punts extret dels digitalitzats per extreure les mesures que interessa.

Per crear aquest mòdul és molt útil fer servir el Sidio Planner. Aquest software s'incorpora en el RobotStudio a l'instal·lar l'AddIn (complement) del Sidio Airus i permet simular el comportament del sistema real en un entorn virtual. La simulació¹³ és la imitació de les operacions d'un procés o sistema del món real al llarg del temps i és una metodologia indispensable per resoldre problemes de la vida real. S'utilitza per descriure i analitzar les propietats i comportament del sistema. Per realitzar la simulació es requereix el model del sistema real. Aquest ha de ser suficientment complex com per poder resoldre les preguntes que apareguin però ha de ser el més simple possible per reduir el temps de càlcul. El model que s'utilitza en aquest treball és una estació virtual que conté els mateixos elements mecànics que la cèl·lula real. Es vol, utilitzant el software de RobotStudio, trobar les vistes que interessa extreure de la peça en qüestió i crear la trajectòria que uneix els punts que la formen.

4.1. Arxiu de trajectòries

La trajectòria està formada per diversos moviments que uneixen els punts en que es volen realitzar digitalitzats. Aquests moviments s'escriuen en un mòdul de RAPID i tenen la següent estructura:

MoveJ punt, velocitat, zona, eina\WObj: = objecte de treball;

El punt és el destí del moviment i té tota la informació tant de la posició com de l'orientació i la configuració dels eixos internes i externs per assolir sempre la mateixa posició

¹³ Handbook of simulation [8]

absoluta. A aquest punt s'hi arriba amb una velocitat que es pot limitar amb les dades de velocitat tant de moviment com de rotació. La informació de les dades de zona indica fins a quina proximitat es vol que s'arribi, si es vol arribar a la posició absoluta es defineix la zona fina però si és un punt de pas i es vol que el robot no freni sinó que canviï de direcció es pot utilitzar una zona de 20 o 50mm. Les dades d'eina i d'objecte de treball incorporen una transformació al robot; la primera de la brida de l'eix 6 fins al TCP o punt d'eina i la segona des del centre del robot fins a la zona de treball, cosa que permet canviar d'eina o de superfície de treball i mantenir el programa.

En aquest tipus de moviments, anomenats moviments en joint, el robot només es fixa en el punt final i no en el recorregut de la trajectòria. Amb aquesta informació el controlador pot calcular mitjançant les equacions de cinemàtica inversa del model del manipulador els valors exactes que han de tenir els 7 eixos (6 interns i l'extern) i començar a moure'ls per arribar als valors desitjats. Així s'aconsegueix arribar a la posició final de la manera més còmode pel robot, movent els eixos de manera lliure des de la posició inicial a la final. Per calcular les velocitats a les que s'han de moure els motors, el robot calcula el temps que necessita el moviment d'eix més llarg i ajusta les velocitats dels altres per fer-los durar el mateix temps.

El fet que no s'imposi cap restricció del recorregut de la trajectòria més que el punt final fa que el capçal del robot pot utilitzar un espai molt elevat durant el moviment i no és fàcil de saber amb anterioritat el recorregut que realitzarà. Per això és important també simular la trajectòria en algun entorn virtual per assegurar que no hi haurà cap col·lisió física a l'executar-la en el robot real.

El Sidio Planner és una eina que ajuda a l'usuari a crear trajectòries d'inspecció pel Sidio Airus. Aquest software permet tant modificar una trajectòria existent com crear-ne una de nova d'un programa que no en tingui. Cada programa que es crea requereix un model tridimensional de la peça que li correspon. Un cop seleccionat el model CAD que correspon a la peça del programa, aquesta apareix en la cèl·lula virtual de color verd per ajudar a diferenciar-la de la resta de components de la cèl·lula.

4.1.1. Treball on-line

El treball en línia es aquell en que es crea la trajectòria del programa d'inspecció en la pròpia cèl·lula ja que durant aquest mode de treball es necessita el robot amb el capçal real per a fer mesures durant el procés de creació del programa. Si es disposa un cert temps de la cèl·lula, es recomana treballar-hi en línia ja que és més directe i no requereix de més software que el RobotStudio.

El primer pas a realitzar és extreure una fotogrametria per ubicar les referències en el volum de treball. Per fer això es necessita el capçal equipat amb la càmera de fotogrametria, l'utilatge de fixació, la peça a mesurar, la barra d'escalat, les referències i els codificats. Acte seguit s'executa un programa de fotogrametria que realitza diverses captures de la cèl·lula, calcula les posicions de les referències i crea un arxiu en que posiciona tots aquests valors.

El segon pas a realitzar és el d'obrir la cèl·lula virtual al RobotStudio. Aquesta cèl·lula ha de contenir com a mínim el capçal i els mateixos elements mecànics que la cèl·lula real, és a dir, el mateix model de robot i de taula. En cas que s'hagi treballat prèviament amb aquesta cèl·lula també es podran observar tots els programes que ja s'han fet. En aquest cas s'utilitza la cèl·lula que s'ha creat en que hi trobem el robot i la taula que es fan servir en la cèl·lula real en les mateixes posicions relatives i en que també es té en consideració la zona que restringeix l'àrea de moviments permesa pel software de seguretat SafeMove 2.

Quan s'obre l'estació virtual en el RobotStudio es té l'opció de crear un nou programa vinculat a un CAD, modificar un programa ja existent o eliminar el programa del RobotStudio. Tot i que no es recomana, aquesta última opció es pot fer tot i que no implica que el programa quedi eliminat de la carpeta del Sidio al sincronitzar-se, sinó que la informació es perd en el RobotStudio i després ja no es podrà modificar res mitjançant l'Addin. Quan es crea un programa nou, aquest carrega el model tridimensional de la peça a mesurar a l'origen de la cèl·lula virtual del RobotStudio.

El següent pas a realitzar és el procés d'alineat per ubicar la peça virtual en la mateixa posició i orientació que la peça real. Aquest procés consisteix en connectar-se al robot des del RobotStudio i realitzar un seguit de digitalitzats en certes posicions estratègiques per obtenir un núvol de punts que serveixi com a referència pel procés d'alineament. Quan es realitza la connexió, s'obren dues finestres; la primera (fig. 13) dóna informació de la càmera i la imatge

que es veu utilitzant l'equivalència de colors descrita a la Taula 1 (apartat 3.2) i l'altra té un esquema del capçal que permet moure la unitat mecànica aplicant offsets o rotacions al capçal del robot en la direcció de les fletxes pressionades (fig 14).

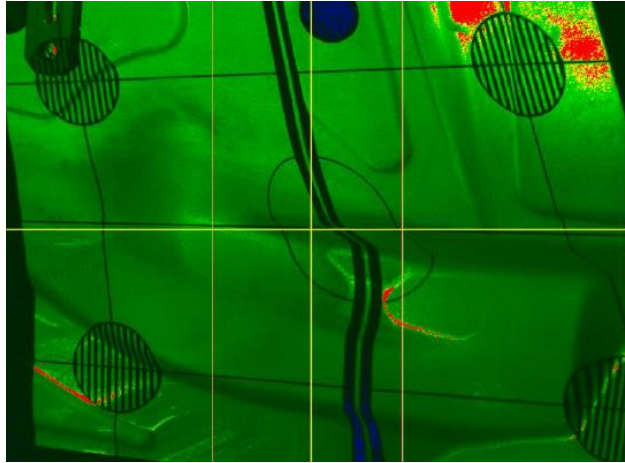


Fig. 13 Imatge captada amb la càmera

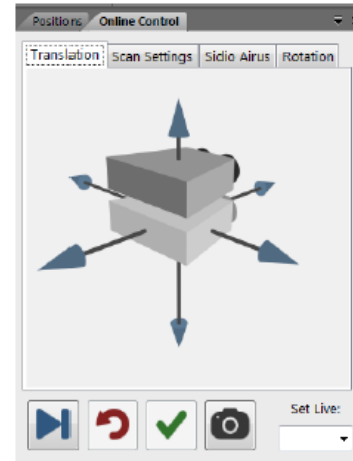


Fig. 14 finestra per fer moviments

En la figura 13 es veu que sobre la imatge captada per la càmera hi ha un patró de dues línies grogues creuades que marquen el centre de la fotografia i dues línies taronges verticals que serveixen com a referència per situar el capçal a una distància correcte de la superfície a digitalitzar. Les dues línies d'ombra gruixudes verticals que veu la càmera en la figura 15 han de quedar entre les dues línies taronges per assegurar que la superfície que es veu està dins del volum de treball. Si les línies d'ombra estan a la dreta de la zona delimitada per les línies taronges el capçal està massa lluny i si estan situades a l'esquerra, massa proper.

Quan s'arriba a una posició en la que el volum de treball de l'escàner conté una part significant i significativa de la peça amb suficients referències per ubicar-les en el món es fa un digitalitzat per extreure el núvol de punts. Es recomana que l'escàner vegi com a mínim 4 referències per obtenir una bona triangulació i que la superfície de la peça que s'observi no sigui un pla sense elements diferenciadors sinó que es busquin cantonades, forats o superfícies rebaixades o ressaltades i superfícies amb canvis de curvatura.

Un cop realitzat el digitalitzat, apareixerà el núvol de punts reals a l'espai virtual. Es poden realitzar els digitalitzats que es desitgin però acostuma a haver suficient amb un parell de dos extrems oposats de la peça per tenir una idea de l'espai que ocupa. Un cop obtinguts els digitalitzats, el següent pas és el d'ajustar la peça manualment realitzant moviments lineals i reorientacions perquè coincideixi bé amb el núvol de punts. Quan s'ha col·locat al seu lloc en

l'espai virtual s'executa una operació anomenada best-fit que acaba d'ajustar la peça per tal d'ubicar la seva superfície de manera que minimitzi la distància amb el núvol de punts extret.

Després de situar la peça, el següent pas és el de realitzar la trajectòria del programa d'inspecció, cosa que es fa off-line utilitzant el model de l'estació. Comença en la posició de repòs o *Home* i ha de servir per moure el robot i la taula per tal d'accedir a totes les vistes de la peça que es vulguin digitalitzar. Utilitzant l'estació virtual es poden moure les unitats mecàniques utilitzant moviments lineals, de rotació i canviant l'angle de l'eix extern (veure fig. 15) per situar el robot en la posició desitjada.

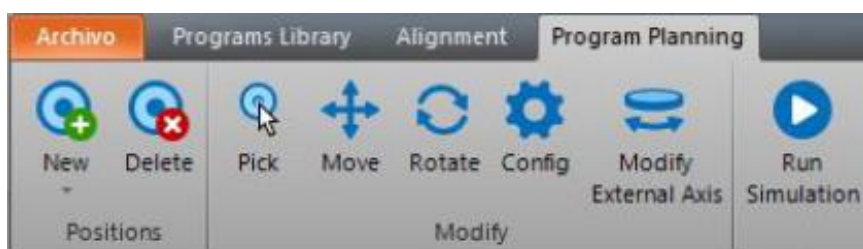


Fig. 15. Accions a realitzar en l'etapa de creació de la trajectòria

Un cop comprovada la trajectòria (veure apartat 4.1.3.), des del RobotStudio es sincronitza el robot amb l'estació real. Això crea un programa complet en que, a part d'incloure la trajectòria, incorpora l'arxiu amb els paràmetres de digitalitzat, l'arxiu tridimensional de la peça i la plantilla del software d'inspecció (que en cas de no haver realitzat cap operació només tindrà el model tridimensional). Després del procés de sincronització el programa creat ja pot executar-se des de l'interfície de l'ordinador.

4.1.2. Treball off-line

El mode de treball fora de línia és el més utilitzat ja que per treballar només es necessita un ordinador amb RobotStudio i una cèl·lula virtual. Normalment no es disposa de la cèl·lula real el temps necessari per tal de realitzar tots els programes de les peces que s'han d'inspeccionar. Aquest mètode permet no tenir aturada la cèl·lula real amb la conseqüent pèrdua de diners i temps productiu associada sinó que a més es poden generar o modificar programes per una cèl·lula que està ubicada a l'altra punta del món.

El software que es fa servir és el mateix però s'han de fer algunes modificacions e el procediment degut a la falta de la cèl·lula real. En cas que es crei un programa, el Sidio demanarà l'arxiu que conté la peça que es vol mesurar i la introduirà a l'origen de l'estació. El

procés d'alineat que es realitza en el mode on-line no es pot fer degut al fet que no disposem dels elements físics per a realitzar una fotogrametria ni extreure núvol de punts. Idealment mitjançant moviments lineals i rotatius s'hauria d'ubicar el model virtual en la posició exacta que ocupa la peça en el món real. Tot i que en la pràctica hi haurà un cert error, prenent com a referència la taula i introduint els utillatges de suport de les peces es pot fer una bona aproximació de la ubicació definitiva. Tot i que és possible que les vistes que es prenguin no siguin exactament les desitjades es pot assegurar que el robot real no col·lidirà amb la peça durant l'execució de la seva trajectòria si l'error és baix.

Després de realitzar el posicionament de la peça en la cèl·lula, el següent pas és el de realitzar la trajectòria del programa d'inspecció. El procés d'escollir les posicions per fer els digitalitzats, els paràmetres de cada una de les vistes i els punts de pas del robot és el mateix que en el treball on-line amb la diferència que, si no es detecta cap col·lisió en aquest cas, no es pot executar la trajectòria en el robot real per obtenir el núvol de punts.

Quan el programa funciona correctament i el simulador no col·lideix en la trajectòria es sincronitza amb l'ordinador del robot real que té els programes d'inspecció i es crea una carpeta nova en el directori de programes del Sidio Airus amb tota la informació, dades i arxius necessaris. Després del procés de sincronització el programa creat ja pot executar-se des de l'interfície de l'ordinador.

Degut a que la trajectòria s'ha dissenyat sobre una peça en una estació virtual que no està alineada completament amb la peça en la realitat, els punts del programa d'inspecció és possible que no obtinguin la informació desitjada. Per això quan es disposa per primer cop del robot s'ha de realitzar primer un procés de fotogrametria i s'ha d'executar un cop la trajectòria sobre un software específic intern de NUB 3D (empresa que pertany a ABB) anomenat Triple¹⁴. Aquest software és el que utilitzava antigament l'empresa quan encara era només NUB 3D que permet connectar-se directament a la càmera del Sidio i realitzar certes accions.

El primer pas a l'obrir el Triple és el de carregar la fotogrametria calculada i moure el robot en manual seguint la trajectòria punt a punt. Aquest software permet connectar l'ordinador directament a la càmera i observar la imatge captada amb l'equivalència de colors descrita a la Taula 1 (apartat 3.2).

14 Triple. El sistema óptico de Nub3D[9]

Quan el robot arriba a una posició de la trajectòria s'observa la pantalla del Triple que mostra el que observa la càmera. En cas que no es vegin les entitats que es volen extreure o es vegin poques referències, es pot moure el robot amb el joystick de la unitat de programació per acabar d'ajustar la posició. Quan la vista és correcta, es realitza un procés de digitalitzat per extreure el núvol de punts i, si és correcte, s'actualitza el valor de la posició del robot. Aquest procés es repeteix en totes les posicions de la trajectòria i, en acabar, es sobreescriu l'arxiu de la trajectòria de la carpeta del programa.

4.1.3. Disseny de trajectòries

Les trajectòries que es defineixen en els programes d'inspecció depenen en gran part de la peça a mesurar i de les entitats que s'hagin d'extreure. En el cas del projecte actual aquestes peces en general són força grans i s'han de captar imatges de diferents vistes, cosa que obliga el robot a arribar a diverses posicions per extreure tota la informació desitjada. Per a dissenyar les trajectòries s'ha de moure el robot en l'entorn virtual fins a les diferents vistes que es volen extreure i guardar les posicions dels punts de la trajectòria després de situar-hi l'objecte que es vol mesurar. Les recomanacions¹⁵ a l'hora d'extreure les vistes és que en cas que s'hagi d'extreure informació d'una superfície plana es col·loqui la càmera de forma frontal. En cas que s'hagi de digitalitzar una aresta l'escàner s'ha de posicionar de tal manera que tant la càmera com el projector impactin amb el mateix angle sobre la peça (veure figures 16 i 17).



Fig. 16 Manera incorrecta d'encarar el capçal

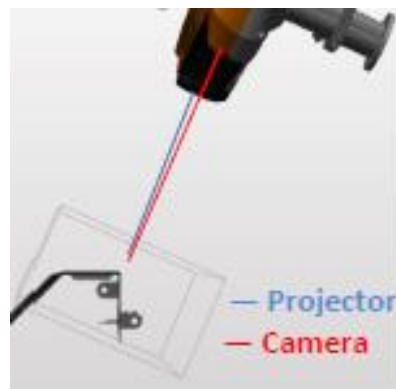


Fig. 17. Manera correcta d'encarar el capçal

En les figures 17 i 18 es veu un exemple de les vistes superior i lateral d'una peça de demostració amb requadres taronges que limiten els digitalitzats que es volen extreure. S'ha utilitzat una peça de demostració per ensenyar aquest procés en el treball perquè per motius de confidencialitat no es poden mostrar imatges de les peces reals per les que s'ha creat el programa.

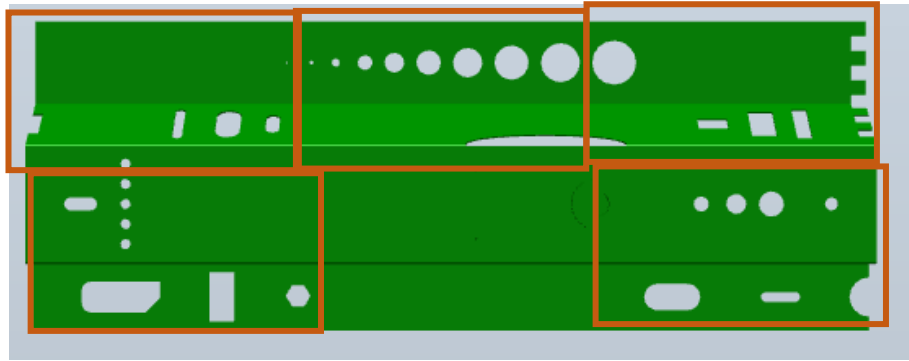


Fig 17. Vista superior d'una peça a inspeccionar amb les vistes que es volen extreure



Fig 18. Vista lateral d'una peça a inspeccionar amb les vistes que es volen extreure

Un cop trobades totes les vistes que interessa digitalitzar i definides les seves posicions és interessant ordenar els punts per obtenir unes trajectòries més eficients. Normalment aquestes trajectòries són les que han de moure el robot relativament poc entre dos punts i amb rotacions mínimes. En el cas concret de la peça de demostració sembla que la trajectòria més ràpida és fer un arc en que es recorrin totes les vistes superiors (arbitràriament s'ha escollit fer-lo d'esquerra a dreta) i després rotar el robot per extreure les tres vistes de la part inferior, començant per la dreta i anant a l'esquerra. En peces més complexes amb major quantitat de vistes i de majors dimensions és important estar atent ja que una mala elecció a l'hora d'escollir l'ordre dels punts de la trajectòria pot incrementar notoriament el temps de cicle de la inspecció.

Un cop escollits els punts de la trajectòria aquesta s'executa en l'entorn virtual. Les unitats mecàniques inicien el moviment per arribar a les posicions que s'han guardat una rere l'altra fins que l'ordinador detecta un xoc o s'arriba al final de la trajectòria. En cas de xoc, es poden modificar els punts programats per millorar les seves configuracions però habitualment

s'afegeixen punts de pas. En un punt de pas el robot no s'aturarà a digitalitzar sinó que executarà la següent instrucció de moviment.

Pot passar que observant la trajectòria es vegi que el robot comença a fer moviments estranys i s'embolica una mica. Això és degut a que a l'hora d'escollir els punts s'hagin agafat correctament però s'hagi pres una rotació del capçal o una configuració d'eixos molt diferent a la del punt predecessor i acostuma a succeir en peces complexes quan s'ha variat força l'ordre dels punts de la trajectòria que s'ha agafat originalment. La solució que es pren és la tornar a agafar la vista problemàtica amb un moviment senzill des de la posició anterior, assegurant una rotació i configuració similars i per tant que el moviment serà més suau.

Si en la simulació de la trajectòria no es detecta cap error, el sistema pot connectar-se a la cèl·lula real i executar-hi el programa. Es recomana que aquest procés es faci en mode manual per limitar la velocitat del capçal i amb una persona atenta per prémer l'aturada d'emergència en el cas que el robot realitzi algun moviment inesperat. A part de comprovar que la trajectòria és correcta, també s'extreu el núvol de punts de la peça. Per extreure aquestes dades de forma correcta s'han de modificar els paràmetres de digitalitzat que té disponible el Sidio Airus.

4.1.4. Paràmetres de digitalitzat

Quan es crea un punt en la trajectòria també s'ha de definir els paràmetres de digitalitzat que ha de tenir aquella vista per extreure les dades de la superfície. Habitualment els digitalitzats tenen dues exposicions, una a molt baixa intensitat per tal de poder detectar les referències i una altra a una intensitat que depèn del tipus de superfície a mesurar, és baixa per superfícies brillants i alta per superfícies fosques i mates. Cada vista que s'afegeix a la trajectòria queda definida amb els mateixos paràmetres que l'anterior així que, si el tipus de superfície no canvia, habitualment s'utilitzen els mateixos paràmetres de digitalitzat per tots els punts i només es canvien les posicions de les unitats mecàniques.

L'extracció del núvol de punts permet observar si els paràmetres de digitalitzat són correctes o si hi ha alguna entitat que no s'acaba d'apreciar bé i es necessita modificar o afegir alguna altra vista per acabar d'extreure les dades correctament. Si el núvol de punts és bo, es pot accedir directament al software d'inspecció en el qual es poden definir les entitats que s'han d'extreure i comprovar si el núvol de punts les calcula correctament o si s'hi ha d'afegir alguna

vista o retocar els paràmetres del digitalitzat. Els que s'utilitzen en aquest projecte són els següents:

Temps d'exposició. Aquest paràmetre determina el temps que l'obturador de la càmera estarà obert durant el procés de digitalitzat, valor proporcional a la quantitat de llum que entra a la càmera. En cas que en una captura coincideixin una superfície clara i una de fosca, existeix la possibilitat de fer fins a 3 digitalitzats amb exposicions diferents per cada vista. El primer digitalitzat està reservat per les referències que són totalment blanques i que es veuen només en l'exposició de 25. Les peces que s'han d'inspeccionar en aquest projecte són metàl·liques que tot i no estar polides brillen força. Per evitar que els punts de la imatge es cremin s'utilitza una exposició de 100 és suficient per obtenir informació de la peça.

Boundaries (Contorns). És una opció que es pot habilitar per identificar automàticament els límits físics de la superfície que s'està digitalitzant. El procés consisteix en afegir un digitalitzat extra a la vista en que el projector emet llum blanca enlloc d'un patró amb ombres. A la imatge obtinguda s'hi aplica la tècnica de detecció d'eixos de Canny on es poden observar els píxels que formen el contorn i ubicar-los en el núvol de punts tridimensional extret en el digitalitzat. Aquest procés s'utilitza per obtenir els contorns de les vistes en que hi ha forats en forma de cercle, rectangle o slots ja que ofereix millors resultats que el digitalitzat ja que en els contorns acostuma a haver soroll degut a un mal angle d'incidència o a la curvatura de la peça.

Mode de digitalitzat. El mode de digitalitzat canvia el patró que emet el projector a la peça i per tant la quantitat de mesures diverses que es poden extreure. Hi ha tres modes de digitalització; el ràpid, el normal i el sensible. El mètode sensible és el que té el patró amb línies més fines i per tant és el que permet obtenir resultats més acurats en les mesures. Aquest mètode s'utilitza quan la precisió requerida en una peça és molt elevada perquè la tolerància permesa és de pocs micròmetres. En el cas de les peces que s'estan inspeccionant les toleràncies estan per sobre els 100 micròmetres així que es pot triar el mode normal, que redueix lleugerament la precisió però permet obtenir mesures en menys temps ja que la quantitat de càlculs necessaris per a cada digitalitzat també disminueix. Utilitzar el mode ràpid dona resultats força més dolents sense millorar gaire el temps de processament del digitalitzat.

Smoothering (Filtre). Activar aquesta opció permet aplicar un filtre al núvol de punts extret d'un digitalitzat per reduir el soroll que es pugui observar en una mesura. El filtre permet

allisar la superfície de la peça, cosa que permet obtenir millors resultats de planor o de contorn d'una superfície. Tot i que requereix un temps afegit de càlcul, els resultats obtinguts amb el filtre són millors, sobretot Es recomana utilitzar aquest procés de smoothing si el digitalitzat es fa amb el mode sensible perquè tot i que requereix un cert temps afegit de càlcul, els resultats que obté són significativament millors que el no incorporar-lo. El resultat de l'extracció del núvol de punts de la peça de demostració que s'ha exposat anteriorment és el que es veu en la figura 19.

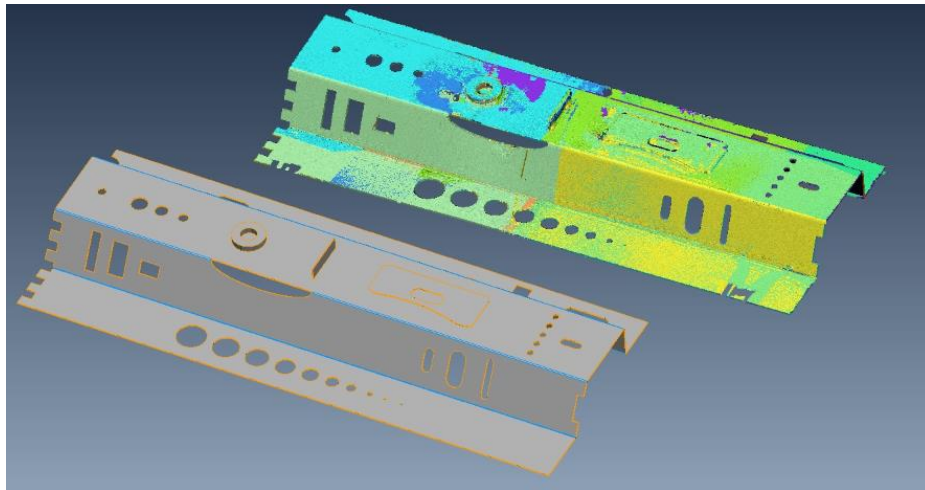


Fig 19. Captura del núvol de punts extret i el model de la peça

En el software d'inspecció cada una de les vistes digitalitzades es carreguen de forma individual i es diferencien amb el color del núvol de punts. En la figura 19 es veuen les diferents vistes preses de la peça de demostració i l'arxiu CAD de la peça. Com es veu en la figura X el núvol de punts no es situa exactament en la mateixa posició que el CAD en la plantilla de Polyworks així que s'ha de fer un processament posterior per adequar aquestes dades i poder extreure mesures. Tant en el cas que s'hagi treballat en línia com fora de línia, els dos mètodes proporcionen trajectòries per realitzar el procés d'inspecció i acaben obtenint un núvol de punts de la peça per comprovar que les vistes són correctes. Per completar el programa d'inspecció es requereix fer un tractament d'aquest núvol de punts per determinar si la peça compleix les especificacions marcades pel client o no.

4.2. Software d'inspecció

Tot i que s'ha treballat força des del departament d'I+D, la companyia ABB no disposa de cap software propi per a realitzar el procés d'inspecció amb la qualitat i rapidesa suficient. Per aquest motiu s'utilitza un software d'una companyia externa.

El software que històricament s'ha utilitzat per realitzar el procés d'inspecció en les cèl·lules d'ABB s'anomena PolyWorks, de l'empresa canadenca InnovMetric. El principal avantatge que ofereix Polyworks respecte els altres softwares d'inspecció que es puguin considerar és que té moltes toolbox que permeten realitzar moltíssimes accions durant l'etapa d'inspecció i pot treballar amb núvols de punts d'alta densitat (fins a 150 milions) per molts sistemes diferents i de forma ràpida.

Aquest software¹⁶ ofereix moltes eines per a la metrologia des del disseny i creació de prototips o solucions d'enginyeria inversa fins a la inspecció de productes finalitzats. Des dels inicis de les cèl·lules d'inspecció que ha venut ABB s'ha escollit aquest software per a realitzar la inspecció ja que és molt versàtil degut a la gran quantitat d'arxius diversos que suporta tant de models poligonals com de núvol de punts i arriba a precisions micromètriques. Això el permet treballar amb qualsevol tecnologia d'inspecció, des de la tecnologia de mesura làser fins a la inspecció amb palpador. Per a poder utilitzar aquest software, l'ordinador ha de tenir endollat un dongle que conté una llicència que dura un any. Quan s'acaba el termini de la llicència, ABB és responsable de fer arribar un dongle nou a l'empresa de destí.

Polyworks és un producte que disposa de diversos programes. El programa principal que es fa servir en les cèl·lules d'inspecció és el Polyworks Inspector. Aquesta part del programa està encarada a controlar les dimensions i la qualitat de peces i diagnosticar problemes de fabricació. Per a fer això el primer pas que es requereix és l'extracció de núvol de punts. Aquesta acció pot realitzar-se amb l'execució d'un programa d'inspecció o extraient el núvol de forma manual amb el software del RobotStudio o amb el programa Triple. Un cop s'obté el núvol de punts s'ha de crear una plantilla d'inspecció que permeti realitzar les mesures demanades pel client i fer un informe de resultats.

¹⁶ *PolyWorks Inspector [10]*

4.2.1. Alinear

Un alineament¹⁷ és una operació de transformació que canvia la posició i l'orientació del núvol de punts per portar-lo en el mateix sistema de coordenades que l'objecte de referència. Aquesta acció és necessària per poder realitzar la posterior extracció de mesures i fer la comparació amb les dimensions nominals.

En el procés d'alineament es modifica la posició del núvol de punts. Totes les transformacions efectuades sobre el núvol de punts es guarden automàticament en l'arbre del Polyworks i s'ordenen de manera cronològica en un grup d'alineament que correspon al núvol de punts que s'està modificant. Cada acció d'alineament nova pren l'anterior com a referència així que la matriu de transformació que la defineix no és global sinó local. En els arxius d'inspecció que es creen en aquest treball hi ha dos processos d'alineament. El primer alineament es fa utilitzant una matriu constant que situa el núvol de punts calculats en una posició aproximada i al final es realitza un alineament específic per cada núvol de punts per acabar-lo d'ajustar al model tridimensional.

Per obtenir la matriu que descriu la transformació des de l'origen del núvol de punts fins a la posició que fa coincidir millor el núvol amb la superfície del model tridimensional s'utilitza un mètode anomenat Best-fit (ajustament òptim) a objecte de mesura. Aquest mètode està compost per dues parts. La primera part consisteix en fer un pre-alineament en que s'escullen uns quants punts superficials en el model poligonal i en el núvol de punts i s'executa un càlcul que realitza el moviment per tal d'ajustar el millor possible els punts escollits. Els punts que s'agafen han de ser llunyans entre sí i a poder ser de diverses cares de la peça. Un cop s'ha realitzat el pre-alineament s'executen un conjunt d'iteracions que realitzen petites modificacions en la posició i orientació del núvol de punts per tal d'encaixar-lo el millor possible a la superfície de la referència (veure fig. 20).

17 Polyworks inspector reference guide [11]

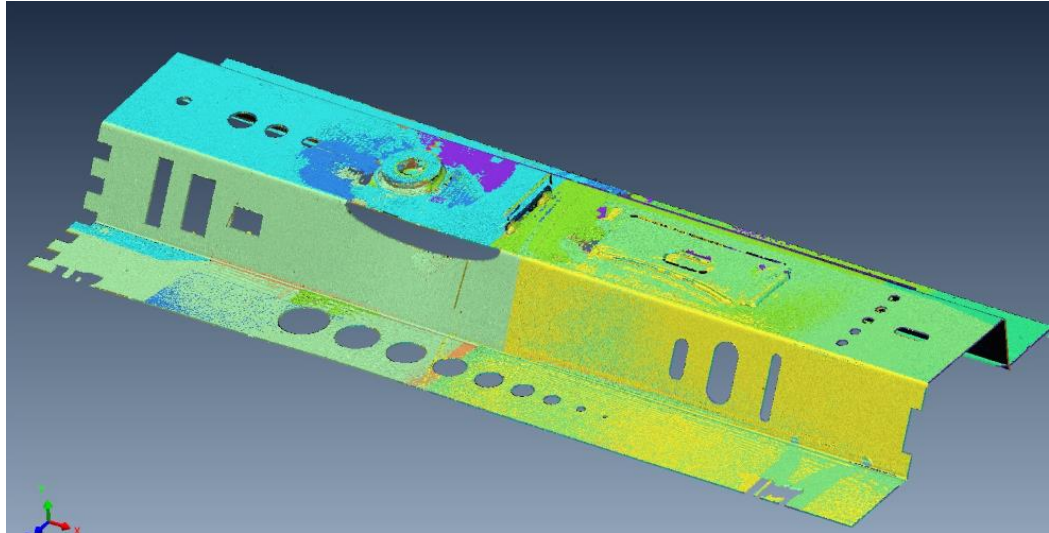


Fig. 20. Representació de la peça i el núvol de punts després d'alineat

En la figura 20 es mostra el resultat d'un procés d'alineat en una peça de demostració ja que per motius de confidencialitat no es pot mostrar el model de la peça real per la qual es fa el programa d'inspecció. Aquest alineament s'exporta en la carpeta del programa del Sidio Airus com una matriu de transformació 4x4 que conté informació de la translació i rotació aplicades al núvol per situar-lo en la posició correcta. Els valors de x, y i z són relatiu a la translació i els valors d' α , β i γ de les rotacions en l'eix Z, Y i X respectivament.

$$\begin{pmatrix} c_{\alpha}c_{\beta} & c_{\alpha}s_{\beta}s_{\gamma} - s_{\alpha}c_{\gamma} & c_{\alpha}s_{\beta}c_{\gamma} + s_{\alpha}s_{\gamma} & x \\ s_{\alpha}c_{\beta} & s_{\alpha}s_{\beta}s_{\gamma} + c_{\alpha}c_{\gamma} & s_{\alpha}s_{\beta}c_{\gamma} - c_{\alpha}s_{\gamma} & y \\ -s_{\beta} & c_{\beta}s_{\gamma} & c_{\beta}c_{\gamma} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig. 21. Representació de la matriu de transformació exportada. Font: Introducció a la robòtica¹⁸

El següent pas és eliminar l'alineament realitzat anteriorment i aplicar un alineament mitjançant matriu escollint l'arxiu exportat en el pas anterior. L'acció que es du a terme és l'aplicació de la transformació del núvol de punts per moure'l els valors que conté la matriu respecte l'origen. Ubicant el núvol de punts en la mateixa posició que en el pas anterior. El problema d'aquest alineament és que la matriu és constant així que es realitza sempre la mateixa transformació del núvol de punts. Quan s'extreu una mesura nova, aquesta té una certa variació i la transformació aplicada pot no deixar el núvol en la posició òptima. Per això es realitza un

¹⁸ Introducció a la robòtica. Cinemàtica dels robots [12]

segon proces d'alineament que modifica lleugerament el núvol de punts per reduir aquesta variabilitat.

El mètode que s'utilitza és el de realitzar l'alineament per RPS (Reference Point System). Aquest mètode és un procediment isostàtic que requereix fixar 6 eixos en diversos punts. Un eix ha de quedar bloquejat 3 vegades, un altre 2 i l'últim 1. Normalment es bloqueja el moviment d'un punt que serveix com origen en tres direccions, un segon punt que bloqueja el moviment en dues direccions i un altre punt en una direcció. També es poden bloquejar diversos eixos de diversos punts. En la figura 22 es mostra el resultat d'un procés de RPS en una peça de demostració ja que per motius de confidencialitat no es pot mostrar el model de la peça real per la qual es fa el programa d'inspecció.

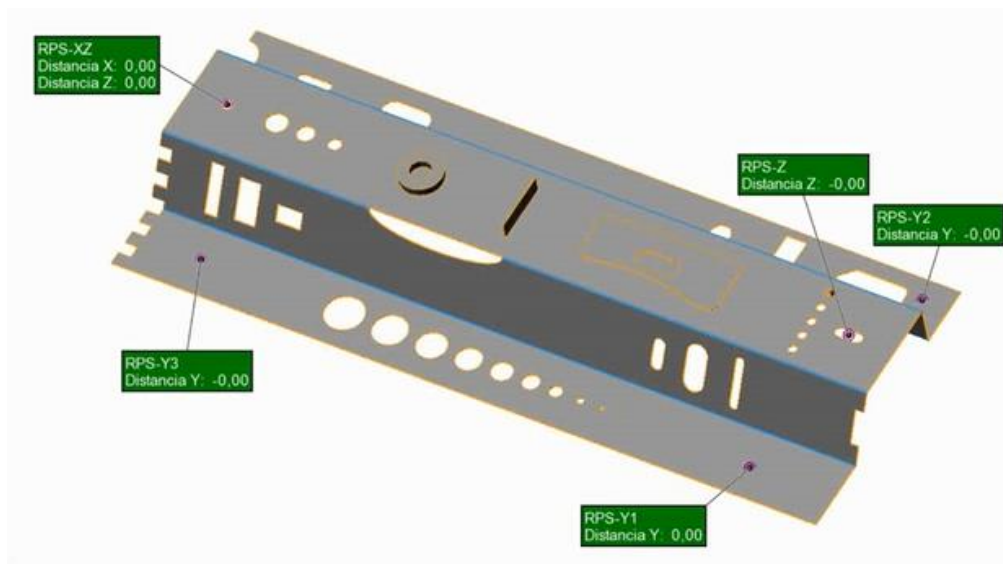


Fig. 22. Procés d'alineament en RPS realitzat en una peça de mostra

4.2.2. Mesurar

Les mesures que es realitzen amb el software d'inspecció es realitzen a través d'unes eines anomenades objectes de mesures que el programador situa sobre el model tridimensional de la peça a mesurar. Aquests objectes permeten extreure els resultats de les dimensions, actualitzar-los en cas de canvi d'alineament i exportar-los en un informe. Aquests resultats es calculen trobant la desviació entre els components nominals que té el model poligonal de referència (el model CAD) amb el núvol de punts mesurat pel sensor. Per millorar els resultats d'algunes entitats es pot utilitzar el núvol de punts que defineix el contorn enlloc de tota la superfície i es poden aplicar filtres per eliminar valors discordants i allisar la superfície.

Quan s'afegeix un objecte de mesura en la plantilla de Polyworks, pot aparèixer una anotació a l'escena 3D. L'anotació és un quadre amb el nom de l'objecte i una taula amb les dimensions nominals que el formen i 3 columnes buides amb espai per escriure les dimensions mesurades, la desviació entre les dues dimensions i el resultat del test de tolerància si és verd, taronja o vermell (veure figura 23). És possible editar el contingut d'aquesta taula per afegir informació (files com angle normal a la superfície o columnes com valors límits de tolerància etc.) o eliminar-ne. També es poden fer altres edicions com la grandària i tipus de lletra, color de fons etc.

Per saber si els resultats són bons o dolents un cop trobada la desviació, a l'hora de crear la plantilla de Polyworks s'ha d'afegir un interval de tolerància per decidir a partir de quin valor un objecte de mesura és erroni. A part el Software permet afegir un interval d'advertiment que fa saltar un warning si el valor extret està dins de toleràncies però també és proper al valor límit, que podria indicar algun error en el sistema. Si tot un objecte té resultats dins de la tolerància sortirà en verd, si té almenys un valor en warning sortirà en taronja i si hi ha algun valor fora de tolerància serà vermell. Hi ha quatre famílies principals d'objectes de mesura:

La família d'entitats simples (punts, línies i poli-línies) està formada per entitats que per sí soles no ofereixen molta informació de la peça i que no acostumen a existir en el model tridimensional. Les poli-línies formen arcs que són utilitzats quan s'han d'extreure contorns que estan situats en superfícies no planes o per extreure els perfils de soldadures i els punts de comparació s'utilitzen per observar la planor d'una superfície emprant únicament un nombre petit de mesures enlloc de tot el núvol de punts. També existeixen els punts de referència que no serveixen per extreure mesures però que s'utilitzen per realitzar alineaments mitjançant el mètode RPS. En la figura 23 es mostra el resultat de l'extracció de dades d'entitats simples en una peça de demostració ja que per motius de confidencialitat no es pot mostrar el model de la peça real per la qual es fa el programa d'inspecció.

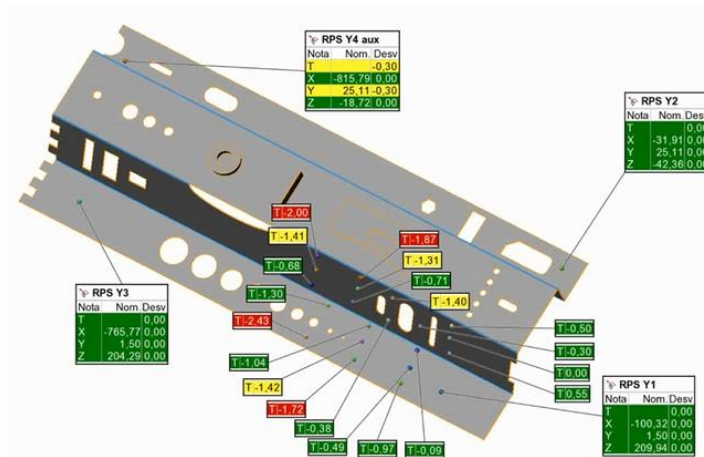


Fig. 23. Extracció de mesures d'entitats simples en una peça de mostra

La família d'entitats basades en corba estan formades per entitats geomètriques planes que tenen un centre i un vector direccional, situades en un pla perfecte en el model tridimensional. Aquestes entitats acostumen a ser forats en forma de circumferència, de rectangle etc. tot i que també poden ser arcs i polígons. Aquestes entitats solen prendre's directament des del model tridimensional ja que són entitats visibles en l'estructura del model poligonal tot i que pot optar-se per prendre altres mètodes explicats anteriorment. Els resultats obtinguts amb aquest mètode ofereixen la posició en que es troba el centre de l'entitat (X,Y,Z) i les dimensions nominals (diàmetre, base i altura, costat etc.). Cada un d'aquests objectes té l'opció de triar els paràmetres en que es vol realitzar la mesura però la diferència principal que ofereix és la possibilitat de triar contorns enlloc de núvol de punts superficials per a extreure els resultats. Els contorns solen oferir més precisió així que si es disposa d'ells és preferible utilitzar-los. En la figura 24 es mostra el resultat de l'extracció de dades d'entitats basades en corba en una peça de demostració ja que per motius de confidencialitat no es pot mostrar el model de la peça real per la qual es fa el programa d'inspecció.



Fig. 24. Extracció de mesures d'entitats basades en corba en una peça de mostra

La família d'entitats basades en superfície són aquelles entitats geomètriques tridimensionals que el seu contorn està definit per una superfície. Les entitats habituals que es mesuren són esferes, cilindres, cons i plans (en la fig 24 es poden veure 2 plans). La majoria d'aquestes entitats es mesuren per la seva superfície externa tot i que el cilindre i el con poden mesurar-se per la superfície interna en cas de forats cilíndrics o cònics. Cal recordar que, degut a la configuració de l'escàner, els forats no poden ser gaire profunds ja que no es podria obtenir informació de la profunditat real i es recomana realitzar dos digitalitzats des de posicions diferents per poder observar tota la superfície interior. Els resultats obtinguts amb aquest mètode ofereixen la posició en que es troba el centre de l'entitat (X,Y,Z) i les dimensions nominals (diàmetre, altura etc.). Aquesta família també té l'entitat de mesurar superfícies corbes que no tenen una geometria habitual i que permet mesurar la desviació mitjana entre una superfície corba qualsevol i els punts obtinguts en la mesura.

La família d'entitats compostes formades per dues o més entitats existents són aquelles entitats que requereixen de més d'un objecte de mesura per poder determinar el valor. Aquestes són les distàncies entre dos punts que poden ser fixes o centres d'entitats, els angles que formen dues arestes situades en un mateix pla o dos plans diferents i la repetició de patrons al llarg de tot el model CAD.

Aquest software també permet afegir mapes de color que són eines que serveixen per mesurar la desviació de tots els punts del núvol respecte el model tridimensional i es mostren aquests valors assignant un color a diversos rangs de valors. Aquests mapes són una manera

fàcil de representar gràficament el comportament del núvol de punts en les diferents zones del model tridimensional i permet observar les zones en que hi ha les deformacions més elevades. Aquest núvol pot realitzar-se calculant la distància a la superfície tridimensional o utilitzar un o dos dels eixos. Degut a que s'han de mesurar distàncies per tots els punts que componen el núvol, realitzar un mapa de calor és un mètode que requereix molt de temps per executar-se i no ofereix valors exactes de les desviacions dels punts. Per aquest motiu aquest procés no s'introdueix habitualment en l'etapa d'inspecció a no ser que l'empresa ho demani expressament, com en aquest cas. En la figura 25 es mostra la representació d'un mapa de colors en una peça de demostració ja que per motius de confidencialitat no es pot mostrar el model de la peça real per la qual es fa el programa d'inspecció.



Fig. 25. Representació d'un mapa de color en una peça de mostra

4.2.3. Creació de l'informe

L'informe o report és un document que crea el software d'inspecció quan ha acabat de fer tots els càlculs i recull tota la informació dels resultats obtinguts que es vol mostrar a l'operari. Aquest report pot contenir informació paramètrica escrita que depengui de l'usuari, del tipus de peça que s'està executant etc. pot incloure captures de pantalla de la peça en que es vegin anotacions amb informació dels objectes de mesura i pot contenir taules que continguin una llista amb tota la informació necessària dels objectes de mesura desitjats.

El report es pot dissenyar de diverses maneres. La més habitual i que es segueix per realitzar els informes en aquest projecte és la de dissenyar un document format per diapositives horitzontals. En aquestes diapositives es poden inserir quadres de textos, captures d'imatges del

Polyworks i taules resum. Per facilitar la lectura del projecte i per estandarditzar tots els informes s'ha seguit una estructura comú.

La primera pàgina serveix com a portada i conté tota la informació que es vulgui afegir sobre la peça que s'ha inspeccionat. En aquest projecte s'ha decidit afegir informació sobre l'element que s'ha inspeccionat (model i número de peça) informació de l'extracció de dades (temps requerit per fer la inspecció, dia i hora de l'informe) i informació sobre l'operari que ha realitzat el procediment.

La segona diapositiva està reservada per informació sobre l'alineament realitzat per RPS (veure fig. 22). Aquesta pàgina conté informació de la bondat en que està alineada la peça amb el model tridimensional i les distàncies que tenen els punts utilitzats per a fer el RPS respecte el seu punt del model tridimensional.

La tercera diapositiva té una taula que resumeix tots els objectes de mesures que hi ha a l'arxiu d'inspecció i els resultats de l'extracció després de prendre les dades. En les peces grans on el número d'elements inspeccionats és molt elevat s'han d'utilitzar dues diapositives per cobrir tota la informació. Aquestes taules inclouen també el resultat del test de tolerància per comprovar de forma ràpida si totes les entitats de la peça estan dins dels valors permesos, si hi ha alguna entitat que té valors extrems tot i que dins de tolerància (warning) i si hi ha alguna fora de tolerància, fent la peça inservible. Amb la informació de la taula ja es pot saber si la peça és bona o no però en les següents diapositives s'incorporen diverses vistes de la peça amb els resultats de les mesures extretes amb les anotacions pertinents i el mapa de color. Això permet identificar visualment la zona que dona problemes. Les taules pot exportar-se a un arxiu csv que es pot obrir amb Excel per cada informe o crear un arxiu amb les dades acumulades.

Un cop dissenyat l'informe es guarda el document com a plantilla d'inspecció en la carpeta del programa corresponent. Quan s'executi el programa, el robot es mourà i el capçal començarà a fer digitalitzats. El núvol de punts extret s'anirà posicionant en l'espai del Polyworks i quan acabi l'últim digitalitzat aquest realitzarà els dos alineaments, l'extracció de dades i ensenyarà per pantalla l'informe de la peça. Per executar el programa s'utilitza una interfície creada per l'ordinador anomenada Sidio Inspector.

4.3. Sidio Inspector

El Sidio inspector¹⁹ es un software dissenyat per NUB3D específicament per ser utilitzat en plantes de producció i que serveix d'interfície de comunicació entre l'operari i la cèl·lula d'inspecció. El seu disseny és molt ordenat i intuïtiu, fet que permet que una persona sense experiència en programació pugui executar els programes d'inspecció que desitgi. A part gràcies a la pantalla tàctil que s'utilitza en aquesta cèl·lula totes les funcions són accessibles sense necessitat de teclat o ratolí, cosa que ajuda a tenir un lloc de treball més net.

A l'obrir el Sidio Inspector en l'ordinador primer es demana un usuari i una contrasenya per poder accedir al contingut del programa. Això és així per motius de seguretat, ja que es pretén evitar que una persona sense la formació adequada i per tant sense autorització pugui posar en marxa el programa ja que un mal funcionament de la cèl·lula podria causar tant danys personals com físics en els components de la cèl·lula.

Un cop realitzat l'accés amb usuari i contrasenya, el Sidio obre una pantalla amb els estats del robot, del capçal i obre el software necessari per a funcionar (veure fig. 26). El Sidio es mantindrà en la pantalla d'estats fins que tots siguin correctes i el robot estigui en les condicions inicials de treball, evitant així l'execució de qualsevol programa en cas que falli alguna cosa o que el robot no estigui en mode automàtic a la posició de *Home*.



Fig 26. Pantalla d'estats amb tots els elements funcionant correctament

Aquesta pantalla ofereix la possibilitat de fer un restart del robot o del sensor en cas que hi hagi algun problema de software o de fallada de connexió, ens permet encendre i apagar la làmpada del projector manualment i moure el robot a la posició de manteniment. La posició de manteniment es un punt predefinit que es pren a l'inicialitzar el robot i que mou el capçal fins a una alçada aproximada d'un metre per tal que l'usuari pugui manipular-lo fàcilment. Quan es clica el botó de manteniment, el robot es mou fins aquesta posició en la que es poden canviar els filtres o la làmpada del projector de forma còmode. La pantalla que s'obre té un únic botó de retorn que mou el robot a la posició de *Home* un cop s'ha acabat el manteniment. Aquests moviments es realitzen a una velocitat reduïda ja que en les operacions de manteniment hi ha operaris dins de la cèl·lula.

Un cop tots els estats són correctes s'accedeix a la pantalla principal del Sidio en que es pot accedir a la pantalla de mesures, a la de calibratge i tornar a la pantalla dels estats (veure fig. 27). El botó de mesures obre una pantalla en la que hi ha una llista dels diferents programes d'inspecció habilitats. Cada un d'aquests programes és una carpeta amb un número específic ubicada en el directori de Sidio Airus Programs. Cada carpeta conté els arxius necessaris per la execució depenent de si és un programa d'inspecció o de fotogrametria i hi ha un arxiu config.txt que serveix per ordenar i habilitar-los en el Sidio Inspector. Aquest arxiu permet ordenar els programes en grups per millorar la comunicació amb la interfície, cosa necessària si la intenció del comprador és la de tenir uns 200 programes d'inspecció diferents per cada taula més algunes trajectòries de fotogrametries.

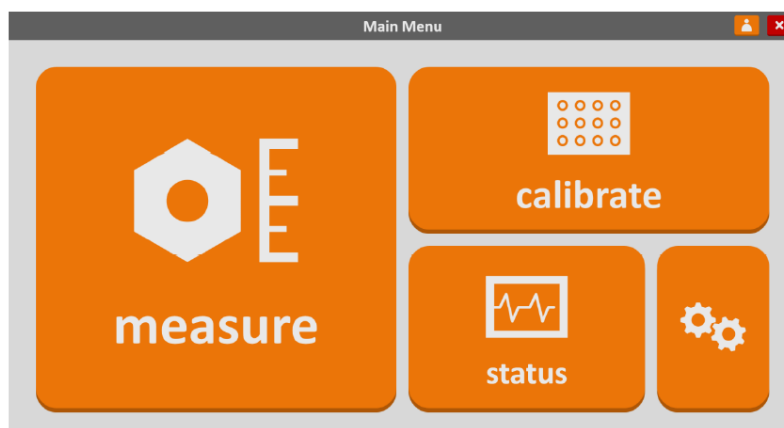


Fig 27. Pantalla principal del Sidio inspector

La carpeta de programes està composta per diversos arxius. Els arxius principals que contenen tots els programes d'inspecció són un mòdul de ràpid (llenguatge de programació del controlador d'ABB) que conté la trajectòria del robot, dues imatges de referència per poder

identificar el programa, un arxiu tridimensional de la peça a mesurar, la matriu d'alineament per situar el núvol de punts sobre el CAD en PolyWorks, un plantilla d'inspecció, i dos arxius amb informació sobre el programa i paràmetres de digitalitzat. Els diferents programes estan diferenciats per carpetes amb diferents números al directori del Sidio Airus Programs però per millorar en la identificació, en el Sidio Inspector cada programa té un nom i una imatge assignades.

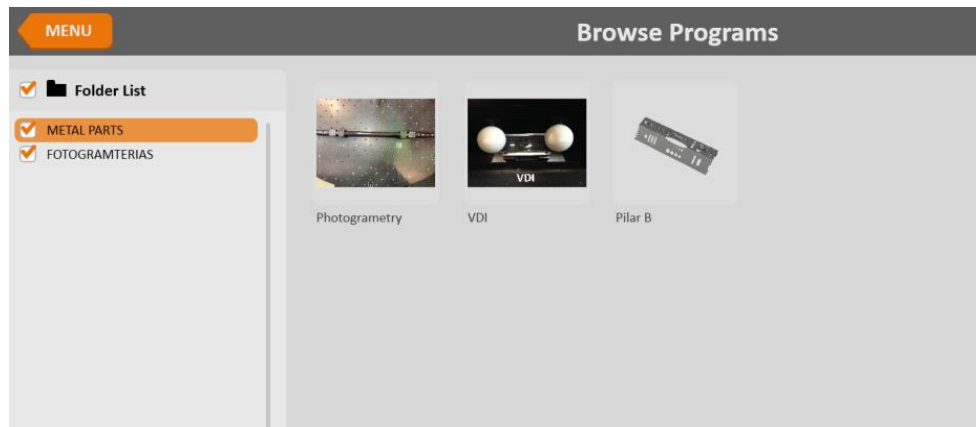


Fig 28. Pantalla amb diferents programes del Sidio Inspector

Un cop es selecciona un programa, s'entra en una pantalla en que hi ha una imatge més gran de la peça a mesurar, i informació de l'operari que està manipulant la cèl·lula. També hi ha informació del programa com el número de digitalitzats que realitza o el temps que ha trigat la ultima inspecció d'aquesta peça. Quan s'executa el programa, el controlador carrega tota la informació necessària des de l'ordinador com la trajectòria o els paràmetres de digitalitzat i comença a moure's. Després de cada digitalitzat envia el núvol de punts al software d'inspecció i quan acaba tots els moviments i torna al punt de *Home* es realitza el procés d'alineament, l'extracció de dades i es genera l'informe, que es mostra per pantalla.

Aquest informe es carrega automàticament en el Sidio Inspector com una presentació de diapositives en la que l'operari pot avançar o retrocedir mitjançant unes fletxes i tornar a la pantalla del programa quan desitgi. Quan es surt de les diapositives l'informe es perd de la interfície però queda guardat en format pdf i csv en un directori anomenat Sidio Airus Programs.

5. Test d'exactitud

Els usuaris d'un sistema de mesures han d'estar segurs que es compleixen un mínim de requeriments per assegurar que els resultats són exactes, és a dir²⁰ que l'instrument de mesures obté valors pròxims al valor vertader de les mesures que s'estan realitzant. Per garantir aquesta exactitud al llarg del temps cal realitzar unes proves de verificació. Aquestes proves es realitzen mitjançant certes mesures del sistema a uns artefactes prèviament calibrats i certificats per una entitat d'acreditació. En aquest sistema es realitzarà aquesta comprovació mitjançant un test VDI. En les cèl·lules estàndard s'utilitza el test VDI 2634/II²¹ que serveix per certificar l'exactitud del sistema òptic. Com el volum de treball és força reduït només cal certificar l'escàner perquè la fotogrametria no incrementa gairebé gens l'error ja que en la majoria de fotografies es veuen totes les referències.

Degut a la grandària d'algunes de les peces que s'han d'inspeccionar, s'ha decidit utilitzar el test VDI 2634/III²². Aquest test serveix no només per certificar que l'escàner funciona adequadament sinó que també serveix per mostrar que els núvols de punts es situen correctament en un espai més ampli, això significa que es comprova també la qualitat de les fotogrametries que realitza el sistema. Aquest test VDI és més complex que l'anterior i requereix molt més temps així que es realitzarà una única vegada per garantir al client que tot el conjunt de la cèl·lula funciona correctament. Per a fer aquest test VDI s'han de seguir uns passos molt concrets:

5.1. L'artefacte a mesurar

L'artefacte és un objecte que té una estructura de fibra de carboni amb dues esferes ceràmiques situades als dos extrems de la barra. Aquest artefacte té unes dimensions nominals de 50 mm de diàmetre per les dues esferes i de 1550 mm de longitud que separen els dos centres de les esferes. Encara que aquestes siguin les dimensions nominals, aquest objecte s'ha d'enviar a una empresa especialitzada que treballi amb l'entitat nacional d'acreditació (ENAC) i realitza un test amb unes màquines molt precises que ens donen les dimensions reals de les dues esferes

²⁰ *Robotica industrial [13]*

²¹ *Test VDI 2634/II [14]*

²² *Test VDI 2634/III [15]*

i de la distància que les separa amb precisions de dècimes de micròmetre. El document que acredita l'artefacte en qüestió dona la següent informació:

Diàmetre certificat per la esfera 1: 49.9984mm.

Diàmetre certificat per la esfera 2: 50.0019mm.

Longitud certificada: 1549.398mm.



Fig 29. Artefacte VDI 2634/III en la seva funda

Degut a la naturalesa de les esferes es demana que es tingui molta cura a l'hora de manipular l'artefacte. S'ha d'evitar al màxim un possible xoc que pugui deformar la superfície o fins i tot el contacte directe amb la pell per evitar que agafin suor, greix o coses similars que puguin deforma-la ja que les precisions en les que estem treballant són de micròmetres. El transport de l'artefacte s'ha de fer en una maleta amb proteccions per dins i l'emmagatzematge en espais amb una humitat relativa el més baixa possible.

5.2. Sistema de coordenades

Una altra informació que ens proveeix aquest document és el sistema de coordenades que s'ha fet servir a l'hora de realitzar el test. Això és important per saber quina és l'esfera 1 i la esfera 2 i per poder situar correctament els mateixos eixos que s'han utilitzat en el procés de certificació en el procés de realització del test.

El sistema de coordenades que s'ha utilitzat té l'origen en el centre de l'esfera 1, la més propera als adhesius d'identificació. L'eix X està situat en la línia que passa pels dos centres de les esferes i amb sentit positiu en direcció a l'esfera 2. L'eix Y s'estableix per la línia que es forma al prendre els dos punts que formen les dues cantonades superiors de la peça de carboni en la que l'esfera 1 està agafada. La direcció positiva de l'eix Y és la direcció en la que hi ha

els adhesius d'identificació. L'eix Z és perpendicular als altres 2 i positiu segons la regla de la mà dreta.

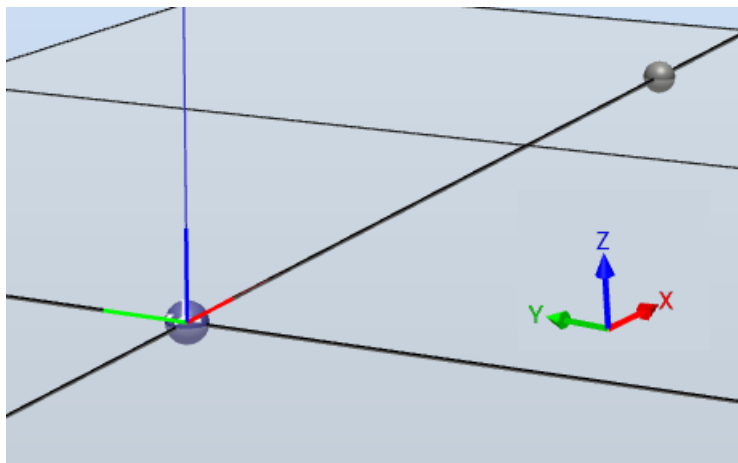


Fig 30. Alineament de l'eix primari (X) i secundari (Y)

Amb les dades de les dimensions exactes que proveeix el document de la ENAC i l'alineament explicat s'ha dissenyat un arxiu CAD que correspon a l'artefacte que es vol mesurar.

5.3. Disseny de l'estructura

Aquest test s'ha realitzat únicament dues vegades en tota la història de NUB3D. Consisteix en inspeccionar l'artefacte del VDI en 3 posicions diferents. Aquestes posicions són horitzontal, a 45 graus i vertical. En els tests que s'han fet anteriorment s'ha utilitzat una estructura de perfils d'alumini força bàsica que era poc estable i introduïa força vibracions al realitzar un petit moviment en la taula rotatòria. En vistes de la creixent demanda de cèl·lules d'inspecció i de la possible entrada de més cèl·lules en un futur per al mateix client s'ha decidit crear una estructura definitiva des de zero.

El principal element de l'estructura és la base en la que es recolzarà el VDI. Aquesta base és un rectangle de 1800mm de llarg (ha de ser més gran que els 1650 mm que hi ha de punta a punta de l'artefacte) i 300 mm d'ample, que ofereix certa estabilitat. Aquesta base s'ha de situar en les tres posicions esmentades així que es requeriran certes columnes que subjectin aquesta estructura en l'aire. S'ha decidit que per motius d'agilitat es compraran els elements necessaris per les 3 configuracions de manera independent i que es mantindran en l'estructura aquelles que no molestin en el recorregut del capçal a l'hora d'executar les trajectòries. En la figura 31 es mostra la base del VDI en les seves tres posicions possibles (gris) les barres

necessàries per la configuració horitzontal (blau), la configuració vertical (taronja) i la configuració diagonal (lila) amb uns recolzaments per millorar l'estabilitat que són permanents (vermell).

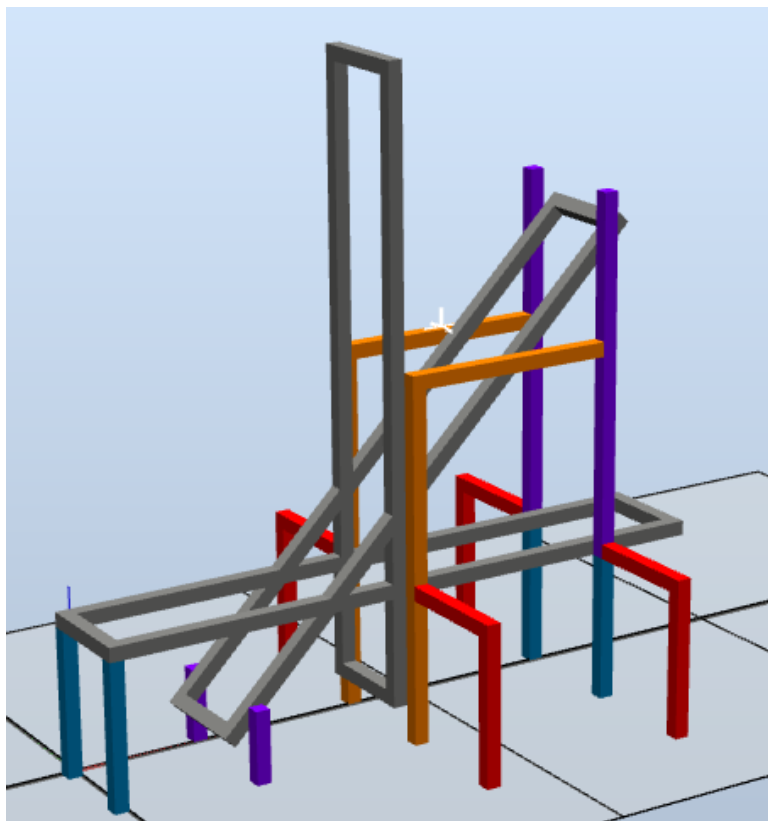


Fig 31 Disseny de l'utilitatge de suport del VDI

Com s'ha dit anteriorment, no es mantenen totes les barres per totes les configuracions del VDI. En cas que es vulgui inspeccionar amb la configuració horitzontal, només cal eliminar les barres taronges horitzontals i les liles llargues, les barres liles curtes queden sota de la zona d'inspecció i les taronges verticals no molesten a l'hora de realitzar digitalitzats perquè estan a uns 80 cm de l'extrem del VDI i a part ajuden en l'estabilitat de l'estructura al tenir un punt de recolzament intermedi en totes les configuracions. En la posició en diagonal només cal eliminar les barres blaves que queden a l'esquerra de la figura 31 i en la estructura vertical només cal eliminar les barres blaves i liles que queden a l'esquerra de la figura 31. Gràcies a aquest disseny modular, qualsevol canvi d'orientació de la base del VDI es pot realitzar amb poc menys de 5 minuts, mentre que desmuntar una estructura per muntar-ne una altra podria arribar a durar més de mitja hora.

El conjunt de perfils d'alumini que s'ha demanat per cobrir tota l'estructura són 2 barres de 200 mm (les liles curtes), 6 barres de 300 mm (horitzontal vermell i extrem de la base del

VDI), 4 barres de 400 mm (color blau i vertical vermell), 2 barres de 500mm (horitzontal taronja), 4 de 1.000mm (vertical taronja i lila) i 2 de 1.800 per les barres llargues de la base. En total son 11.800 mm de perfils d'alumini. També es necessiten uns 40 escaires per tota l'estructura. Un cop arriben tots els materials es pot procedir a la realització del test en sí.

5.4. Mode d'operació

Abans de realitzar el test s'ha de calibrar el sensor segons el procediment explicat en el punt 3.2 o de forma automàtica des del Sidio Inspector (veure fig. 27 del apartat 4.3). Després d'encendre el sistema s'ha de considerar el temps d'escalfament del capçal abans de realitzar el test per assegurar unes mesures correctes.

El test consisteix en realitzar un mínim de 5 mesures diferents de cada una de les boles des de posicions i orientacions molt diverses per tal d'abarc ar el màxim de superfície de les esferes. Els digitalitzats s'han de fer en mode sensible i sense aplicar cap filtre. Un cop realitzats tots els digitalitzats es realitzarà l'alineació del núvol de punts segons el sistema de coordenades explicat en el punt anterior i es procedirà a l'extracció de les dimensions mesurades dels dos diàmetres i de la longitud que els separa.

La peça ha d'estar fixa a l'utilatge que està enclavat a la taula però s'ha hem d'assegurar que la força exercida sobre l'artefacte és mínima ja que, tot i ser de fibra de carboni, es pretén evitar una possible deformació de les barres. També és necessari que a l'hora de realitzar els digitalitzats no hi hagi una sobreexposició sobre la superfície de les esferes ja que podrien arribar a dilatar-se lleugerament i, a part, la superfície no es veuria correctament ja que una exposició elevada crema la foto d'una superfície blanca.

Així doncs els paràmetres de digitalitzat utilitzats per a realitzar aquestes mesures són en mode sensible, sense extracció de contorns, sense reducció de la resolució de la imatge i amb un smoothing suau que allisi la superfície de les esferes.

Degut a la naturalesa de l'artefacte i a la gran precisió que es requereix per saber si les mesures són correctes o errònies es fa un post-procés del núvol de punts abans d'extreure les mesures. Aquest procés consisteix en realitzar l'alineament segons els targets de la fotogrametria i acte seguit s'eliminen tots els punts que difereixen en més de 0.5 mm respecte les superfícies de les esferes del CAD que correspon a l'artefacte. El nuvol de punts resultant

són dues esferes quasi perfectes (hi ha un petit arrodoniment a la zona per les que estan subjectes) i es fa un segon alineat on es fa coincidir els centres de l'esfera 1 tant virtual com del núvol de punts i es fa coincidir el centre del núvol de la segona esfera en l'eix X de l'artefacte. Després s'extreuen les dues mesures de diàmetre i longitud entre esferes i s'exporten a un arxiu .csv que recull l'historial de mesures preses.

Per tal de garantir el bon funcionament de la cèl·lula, ABB realitza 6 proves d'inspecció sobre l'artefacte del VDI en 3 posicions diferents. Això es fa degut a que el volum en que la cèl·lula haurà de treballar és molt gran i per tant s'ha d'assegurar que els resultats que s'observen en totes les proves són prou precisos i no hi ha cap posició en la que s'empitjori moltíssim la qualitat de les mesures.

Així doncs el test VDI està compost per 18 mesures. Cada una d'aquestes mesures està formada per un procés de fotogrametria + programa d'inspecció. Per poder assolir les tres diferents posicions s'ha ideat un utilatge compost per estructures de perfils d'alumini que, un cop muntada, és fàcil de manipular. Aquesta estructura està pensada per col·locar la barra del VDI o bé paral·lela al terra, a 45 graus o completament vertical. Al llarg d'aquesta estructura s'han col·locat també referències i codificats que són necessaris per a realitzar la fotogrametria i els processos d'inspecció.



Fig. 32. Fotografies de l'artefacte situat sobre l'estructura per posar-lo en diverses posicions

Les condicions en les que s'han de dur a terme aquestes operacions són en un espai el màxim lliure possible de vibracions i amb una llum externa de màxim 2000 lúmens.

5.5. Resultats

Un cop realitzades les 6 inspeccions de l'artefacte en les 3 orientacions esmentades anteriorment s'utilitzen els arxius csv que s'han exportat per comprovar els resultats. La exactitud es dona en termes d'inexactitud així que s'han recollit les desviacions de cada una de les mesures respecte el valor nominal. En la següent taula hi ha dues columnes en que es mostra l'error PS, que és la diferència entre les dimensions real i mesurada dels diàmetres de les esferes, i el LE, que és l'error de longitud entre els centres de les dues esferes:

| Test VDI 2634/III (mm) | | Error PS1 | Error PS2 | Error LE |
|------------------------|-----------|------------------|------------------|-----------------|
| Posició 0° | 1. Mesura | -0,029 | -0,028 | -0,099 |
| | 2. Mesura | -0,059 | -0,028 | -0,091 |
| | 3. Mesura | 0,019 | -0,014 | 0,096 |
| | 4. Mesura | -0,037 | 0,065 | -0,048 |
| | 5. Mesura | -0,064 | -0,03 | -0,048 |
| | 6. Mesura | -0,029 | -0,046 | 0,098 |
| Posició 45° | 1. Mesura | -0,02 | -0,058 | -0,098 |
| | 2. Mesura | -0,03 | -0,031 | -0,049 |
| | 3. Mesura | -0,027 | -0,027 | -0,05 |
| | 4. Mesura | -0,021 | -0,008 | -0,061 |
| | 5. Mesura | -0,059 | -0,055 | -0,067 |
| | 6. Mesura | -0,031 | -0,003 | -0,053 |
| Posició 90° | 1. Mesura | -0,061 | 0,047 | 0,076 |
| | 2. Mesura | 0,04 | -0,001 | 0,074 |
| | 3. Mesura | 0,024 | 0,005 | 0,081 |
| | 4. Mesura | 0,02 | -0,011 | 0,115 |
| | 5. Mesura | 0,042 | 0,049 | 0,112 |
| | 6. Mesura | 0,007 | 0,024 | 0,1 |

Taula 2. Resultats del Test VDI

Es pot observar que en les tres posicions el grau de desviacions són similars tot i que s'aprecia una desviació lleugerament més gran en l'error de diàmetre en les proves que s'han realitzat amb l'artefacte horitzontal i de longitud quan l'artefacte s'ha ubicat de forma vertical. Això era esperable ja que quan l'artefacte està horitzontal la càmera de fotogrametria queda molt lluny de les referències augmentant la incertesa de la mesura (que en aquesta càmera és de

16 μ +16 μ /m) i les mesures de longitud en l'eix vertical són lleugerament pitjors degut al fet que la barra d'escalat està situada completament perpendicular a la longitud a mesurar i al realitzar la fotogrametria l'error es propaga.

Tot i això els resultats obtinguts són correctes ja que el valor màxim permès per aquest test és una desviació de 75 μ m per SP i de 150 μ m per LE. Així doncs aquesta cèl·lula (incloent capçal Sidio, càmera de fotogrametria i barra d'escalat) queda certificada conforme els resultats que obtindrà són correctes dins l'estàndard d'ABB.

5.6. Test VDI II

Si es vol comprovar que el capçal funciona correctament quan la cèl·lula ja està instal·lada i funcionant es pot utilitzar el mètode del VDI 2634/II²³. Aquest test consisteix en comprovar les dimensions de dues boles certificades que se situen a una distància molt propera entre elles amb un únic digitalitzat. Aquest test permet comprovar que l'escàner obté en el núvol de punts una esfera de les dimensions especificades en el document d'acreditació i per tant que els digitalitzats es realitzen correctament.

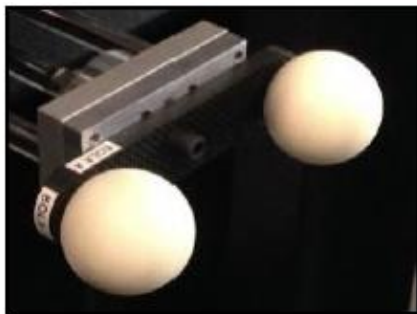


Fig. 32. Artefacte VDI 2634/II

Aquest mètode és força similar al que s'ha explicat en el VDI III tot i que per les dimensions de l'artefacte pot ubicar-se en un espai fix de la cèl·lula i utilitzar-se en qualsevol moment per obtenir resultats. L'únic altre element que incorpora la cèl·lula que necessita utilitzar esporàdicament i que per això està amagat és la placa de calibratge. Per això es col·loquen els dos elements en la mateixa zona i pot incorporar-se el procés de comprovació del VDI a l'executar un calibratge de la càmera. Si l'error de diàmetre mesurat en les diferents vistes i l'error de la distància mesurada són menors a 20 micres el test és bo.

²³ Test VDI 2634/II [14]

6. Test de precisió

Tots els usuaris d'un sistema de mesures²⁴ han de verificar que la precisió del sistema és bona, és a dir que diferents mesures extretes no difereixen molt unes de les altres. Hi ha moltes condicions que poden induir a l'aparició de desviacions en dues mesures de la mateixa dimensió. Aquestes poden ser degudes a l'instrument de mesura, la ubicació, la temperatura, l'observador etc. Per assegurar la precisió²⁵ del sistema es realitza un estudi R&R, que analitza la repetibilitat de l'instrument de mesura i reproductibilitat de la desviació deguda a l'acció de l'operari. Aquest test és una metodologia que serveix per determinar la quantitat de desviació detectada en les mesures que és deguda a l'equip i la que és deguda a l'operari.

6.1. Test de repetibilitat

El test de repetibilitat consisteix en calcular la desviació de les mesures fetes per l'instrument sota unes mateixes condicions de treball. Per aconseguir aquestes característiques es requereix que les diferents mesures es prenguin amb el mateix sistema, de forma seguida i sense modificar cap element. Per extreure aquestes mesures s'ha de crear un programa d'inspecció (veure apartat 4) amb la seva trajectòria i plantilla de Polyworks.

La peça que s'ha utilitzat per extreure les dades és una peça que, per motius de confidencialitat, no es pot mostrar però de la que s'han adquirit 3 dimensions que s'utilitzaran pel test. Aquestes dimensions són un diàmetre d'un forat que de nominal mesura 6 mm, una distància entre dos entitats situades a 220 mm que es poden observar en una sola vista i la distancia entre dos entitats situades a 728 mm que s'observen en dues vistes diferents.

El test s'ha dut a terme executant 30 vegades seguides el programa d'inspecció i s'han recollit les dades que s'han extret en l'arxiu csv de les dades acumulades la carpeta de resultats del Sidio Airus. Per facilitar la lectura de les dades s'ha creat una taula resum amb els resultats obtinguts:

²⁴ *Robotica industrial [13]*

²⁵ *Estudis R&R, Control de recepció, fiabilitat [16]*

| Dimensió (mm) | Nominal | Mitjana | Desviació estàndard | Rang |
|---------------|---------|---------|---------------------|-------|
| Diàmetre | 6,000 | 5,973 | 0,009 | 0,022 |
| Distància 1 | 220,000 | 220,040 | 0,012 | 0,035 |
| Distància 2 | 728,000 | 727,968 | 0,021 | 0,067 |

Taula 3. Resum dels resultats obtinguts en el test de repetibilitat

6.2. Test de reproductibilitat

El test de reproductibilitat serveix en aquest cas per calcular la variància que aporta a les mesures l'acció d'un operari. El test consisteix en calcular la desviació de les mesures fetes per l'instrument sota unes mateixes condicions de treball amb un procés de descàrrega i carrega de la mateixa peça sobre el mateix utilatge realitzat per un únic operari. El test s'ha dut a terme executant 30 vegades seguides el mateix programa d'inspecció que en el test anterior fent el procés de descàrrega i càrrega entre inspeccions i s'han recollit les dades que s'han extret en l'arxiu csv de les dades acumulades la carpeta de resultats del Sidio Airus. El resum dels resultats obtinguts es mostra en la taula 4.

| Dimensió (mm) | Nominal | Mitjana | Desviació estàndard | Rang |
|---------------|---------|---------|---------------------|-------|
| Diàmetre | 6,000 | 5,975 | 0,011 | 0,028 |
| Longitud 1 | 220,000 | 220,038 | 0,018 | 0,041 |
| Longitud 2 | 728,000 | 727,987 | 0,028 | 0,085 |

Taula 4. Resum dels resultats obtinguts en el test de reproductibilitat

6.3. Conclusions test R&R

El test de repetibilitat i reproductibilitat té una tercera fase que consisteix en realitzar les mesures sobre peces diferents per tal de calcular la variància que es detecta peça a peça. La idea del test és comprovar que la variància detectada pel sistema de mesura entre dues o més peces peces no sigui deguda ni al sistema de mesura ni al procés de càrrega i descàrrega sinó que sigui principalment a causa de la variància real que tenen les peces entre sí.

Les propietats²⁶ de la variabilitat estadística conclouen que la variància trobada en el test de reproductibilitat serà igual a la suma de la que incorpora el sistema més la deguda a l'operari. Amb les dades de la taula 3 i 4 s'han calculat aquestes variàncies:

| Dimensió (mm ²) | Variància sistema | Variància reproductibilitat | Variància càrrega-descàrrega |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Diàmetre | 81×10^{-6} | 121×10^{-6} | 40×10^{-6} |
| Longitud 1 | 144×10^{-6} | 361×10^{-6} | 217×10^{-6} |
| Longitud 2 | 441×10^{-6} | 841×10^{-6} | 400×10^{-6} |

Taula 5. Càlcul de les variàncies atribuïbles als operaris

Es pot comprovar a la taula 5 que la variabilitat que incorpora el sistema de mesura i la que afegeixen els operaris tenen ordres de magnitud similars. Tot i que es podia esperar un valor de la desviació del procés de descàrrega i càrrega més elevat que unes micres, degut a que l'utilatge té relativament pocs punts de recolzament, el fet de realitzar un alineament de RPS en l'etapa d'inspecció elimina gran part de l'error comès per l'operari. Al tenir les dues variàncies graus de magnitud similar, si es desitges reduir la variabilitat global s'haurien de millorar tant el sistema de mesura com l'etapa de càrrega i descàrrega per notar un canvi significatiu.

L'últim pas d'un test de R&R és realitzar un altre conjunt de mesures en que s'inspeccionen de diverses peces diferents de forma aleatòria i es calcula la variància entre peces eliminant la trobada la deguda a la reproductibilitat. L'objectiu és determinar que la variància que es trobarà al llarg de la inspecció de les peces és deguda principalment a la desviació del procés productiu i no de l'aparell de mesura. Degut a que no es disposa de suficients peces de cap model en el taller d'ABB aquest procés s'hauria de fer en la línia de producció.

²⁶ Estadística descriptiva [17]

7. Planificació.

Les accions descrites en aquest projecte no representen el global de totes les accions que cal dur a terme en la cèl·lula de metrologia. Per aquest motiu s'ha fet la planificació (Fig. 33) dividint les etapes de les accions descrites en aquest document en blau fosc i les accions que s'han dut a terme en el passat d'un color blau grisaci.

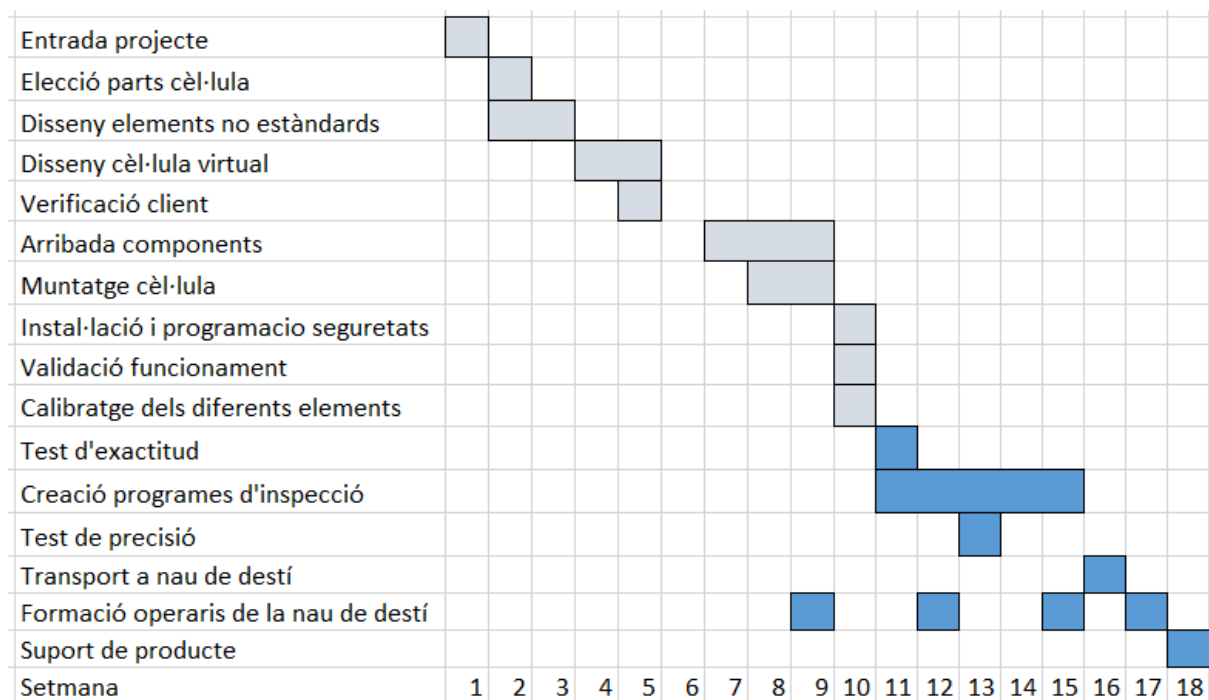


Fig. 33. Diagrama de Gantt amb els temps requerits per l'execució del projecte

Quan s'ha muntat la cèl·lula, el primer pas és comprovar que el sistema funciona correctament. El primer pas és realitzar el test d'exactitud de les mesures amb l'artefacte VDI. Si els resultats són correctes, es comencen a fer els 8 programes d'inspecció que ha de lliurar ABB amb la cèl·lula. Quan es té acabat el primer programa es fa el test de precisió per comprovar la repetibilitat de les mesures extretes. Quan s'acaben tots els programes d'inspecció que per contracte s'han de lliurar a l'empresa client, s'envia la cèl·lula a la nau de destí i allà s'acaba de fer la formació requerida als operaris i caps de nau. Un cop s'ha instal·lada la cèl·lula en la nau de destí es realitza suport de producte des de Barcelona en cas d'errors o dubtes.

El client és l'encarregat de realitzar les tasques de manteniment necessàries per tots els elements del sistema, principalment son la neteja de filtres d'aire i canvi de la làmpada del Sidio. També s'ha de fer de forma periòdica processos de calibratge de la càmera.

8.Pressupost

El pressupost conté les despeses previstes per l'execució del projecte. El projecte actual comprèn des del moment en que s'ha muntat la cèl·lula fins el moment en que s'entrega a la nau de destí. En la següent taula es mostren els diferents conceptes de les despeses del projecte i el seu valor. Els números que apareixen són aproximacions ja que per motius de confidencialitat no s'ha tingut accés als valors reals de les despeses.

En aquest pressupost no es té en consideració els elements que es requereixen per realitzar el test del VDI 2634/III ja que tant l'artefacte com l'estructura de barres que s'ha utilitzat són propietat d'ABB i es poden utilitzar en futurs projectes.

| <i>Element</i> | <i>Despesa</i> |
|--------------------------------------------------|-----------------|
| <i>Codificats</i> | 300 € |
| <i>Referències</i> | 400 € |
| <i>Barra d'escalat + certificació dimensions</i> | 3.000 € |
| <i>Llicència software de fotogrametria</i> | 1.000 € |
| Total fotogrametria | 4.700 € |
| <i>Dongle de llicència Polyworks</i> | 7.000 € |
| <i>Llicència RobotStudio</i> | 500 € |
| Total software | 7.500 € |
| <i>Hores de test i programació</i> | 8.000 € |
| <i>Hores de formació</i> | 4.000 € |
| <i>Transport i dietes</i> | 1.000 € |
| Total personal | 13.000 € |
| Electricitat | 300 € |
| Transport a destí | 20.000 € |
| <i>Total pressupost</i> | 45.500 € |

Taula 7. Pressupost del projecte per conceptes

9. Impacte ambiental

Per calcular l'impacte ambiental del projecte es té en consideració tot l'impacte que causa des de la concepció fins la implementació final en la nau de destí. La cèl·lula de metrologia s'ubicarà dins d'una nau industrial de Suècia, així que no provocarà cap impacte visual o paisatgístic. Segons les característiques dels diferents elements que componen la cèl·lula, el soroll màxim que es pot sentir és menor a 70 dB en les pitjors condicions de treball. L'únic impacte que pot tenir en el personal de la nau és el dany de les retines per culpa del projector del Sidio Airus. Una exposició directe continuada pot arribar a provocar ceguera irreversible.

La petjada de CO₂ del projecte és principalment deguda al diòxid de carboni que s'emet a l'ambient durant l'etapa de transport. En aquest projecte s'ha de considerar el transport de la cèl·lula fins a la nau de destí. Aquests transport es realitzen amb camió per carretera que consumeix uns 1200 litres de benzina en el recorregut Barcelona-Umea.

El principal risc pel medi ambient que suposa aquest projecte és degut a l'ús de mercuri en la làmpada del projector del Sidio Airus. El tractament incorrecte d'aquest element provoca que s'alliberi mercuri en l'ambient que pot evaporar-se i acabar penetrant en el sòl o en aigües i posteriorment en la biosfera. El mercuri, com altres metalls pesats, pot provocar una forta intoxicació en els animals danyant principalment el sistema digestiu i renal.

La resta d'elements que componen la cèl·lula són habituals en la indústria i estan compostos principalment per metalls que es poden reaprofitar i materials plàstics i vidres que es poden reciclar.

Conclusions

Hi ha dos objectius principals que s'han assolit en aquest projecte. El primer és crear 8 programes d'inspecció complets de peces diferents que es fabriquen en la companyia que ha comprat la cèl·lula per obtenir un informe en que es detalli les dimensions de les entitats desitjades i si aquestes dimensions entren dins de les toleràncies que marca el client.

Per crear els informes d'inspecció es requereix una trajectòria del robot que situï la càmera en les vistes necessàries per extreure totes les entitats de mesura que demana el client. En aquestes vistes s'extreuen les mesures amb el capçal Sidio Airus i acte seguit es compara el núvol de punts extret amb el model tridimensional de referència per extreure les desviacions en una taula resum. Finalment es realitza un test de toleràncies per comprovar si la peça compleix les especificacions marcades pel client. La mitjana dels temps de cicle d'inspecció en els 8 programes creats és de prop de 3 minuts i mig, aconseguint així una reducció molt notòria respecte els 20 minuts de temps de cicle que triga el sistema actual amb la inspecció utilitzant màquines CMM.

El segon objectiu d'aquest treball és poder certificar a l'empresa de destí que la cèl·lula d'inspecció funciona correctament assegurant la exactitud i repetibilitat de les mesures que s'extreuen. Per assolir aquest objectiu principal s'han de complir dos de secundaris. Un és verificar que l'exactitud de l'extracció de les mesures és correcta i l'altre és verificar-ne la repetibilitat.

L'exactitud està relacionada amb el biaix de les mesures preses respecte el nominal del valor que haurien de tenir. Per valorar aquesta exactitud s'ha de dur a terme un test en que s'inspecciona un artefacte VDI que té dues esferes ceràmiques de dimensions certificades amb precisions de dècimes de micròmetre. S'executen un seguit de programes d'inspecció en angles diferents de l'artefacte per certificar que el sistema treballa correctament en tot el volum de treball i es comparen els resultats de les mesures extretes amb els del document certificat. La pitjor mesura extreta en cada una de les dimensions és millor que el límit imposat per ABB per certificar l'exactitud de la cèl·lula.

La precisió està relacionada amb la dispersió de les mesures extretes. Per valorar aquesta característica s'ha dut a terme un test de repetibilitat i reproductibilitat. En aquest test s'extreuen certes dimensions d'una peça un seguit de vegades sense modificar res del sistema res i en el

de reproductibilitat s'extreu una altra sèrie de mesures realitzant operacions de descàrrega i càrrega de la mateixa peça en l'utilatge. Gràcies a les desviacions extretes en aquestes dues sèries de mesures es pot determinar la desviació deguda al sistema i la deguda al procés de càrrega i descàrrega.

El grau de magnitud de les desviacions dels dos mètodes és de desenes de micròmetres, el mateix que el grau de magnitud de la desviació trobada en l'etapa de calibratge de la càmera, del volum de treball de la fotogrametria i del test d'exactitud utilitzant el VDI. Per minimitzar el màxim l'error que es pot produir degut al sistema, es recomana que només s'utilitzi en casos en que les toleràncies de la peça a mesurar siguin d'un grau superior, rondant la dècima de mil·límetre. En toleràncies menors la desviació que es pot introduir en la mesura per part del sistema és massa elevada i podria dur a errors per falsos positius o falsos negatius.

Després de verificar el funcionament del sistema i de crear els programes d'inspecció s'ha d'enviar la cèl·lula de forma íntegra a la nau de destí i, un cop allà, comprovar que tot el sistema funciona correctament i formar els operaris en la normativa de seguretats i programació de la cèl·lula perquè puguin crear els programes d'inspecció restants. Un cop finalitzada la posada en marxa es realitza suport de producte a distància en cas que sorgeixin dubtes o el sistema falli.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques:

- [1] Luna Pérez, David. *Disseny d'una cèl·lula robòtica d'inspecció*. ETSEIB. 2018.
- [2] Centry Product Design Solutions. *3D Scanning Technology*.
<<http://www.3dscanmasters.com/3d-scanning.html>> [Consulta: 21/05/2018].
- [3] Gupta, Mohit; G. Narasimhan, Srinivasa; Agrawal, Amit; Veeraraghavan, Ashok. *Structured Light 3D scanning*. Carnegie Mellon University. 2016.
<<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/16823-s16/www/T3P5.pdf>> [Consulta: 12/06/2018]
- [4] ABB. *FlexInspect User Manual*. Documentació interna. 2016.
- [5] Geodetic systems. *What is photogrammetry*.
<<https://geodetic.ssl.jackmarlow.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>> [Consulta: 21/05/2018]
- [6] Brown, John. *V-Stars/S Acceptance test results*. Geodetic systems.
<<https://www.geodetic.com/f.ashx/papers/S-Acceptance-Test-Results-imperial-version.pdf>> [Consulta: 29/04/2018]
- [7] Geodetic systems. *Why V-Stars* <<https://www.geodetic.com/v-stars/>> [Consulta: 29/04/2018]
- [8] Banks, Jerry. *Handbook of simulation*. Georgia Institute of Technology. 1998.
- [9] Vision Systems Spain. *Triple. El sistema óptico de Nub3D*. 2008.
<<https://spainvisionsystems.wordpress.com/2008/11/26/el-sistema-optico-triple-de-nub3d/>> [Consulta: 02/06/2018]
- [10] Innovmetric Software. *Polyworks inspector*
<<https://www.innovmetric.com/es/productos/polyworks-inspector>> [Consulta: 10/06/2018]
- [11] Innovmetric Software. *Polyworks Inspector 2017 Reference guide*. 2018.

[12] Sanfeliu, Alberto. *Introducció a la robòtica. Cinemàtica de robots*. UPC. 2014.

[13] Ferraté, Gabriel. *Robòtica industrial*. Editorial Marcombo. 1986.

[14] Verein Deutscher Ingenieure. *Optical 3D measuring systems. Optical systems based on area scanning*. <http://www.vdi.eu/uploads/tx_vdirili/pdf/1456386.pdf>. 2012. [Consulta: 12/04/2018]

[15] Verein Deutscher Ingenieure. *Optical 3D measuring systems. Multiple view systems based on area scanning*. <http://www.vdi.eu/uploads/tx_vdirili/pdf/1456386.pdf> 2008. [Consulta: 12/04/2018]

[16] Departament d'Estadística i Investigació Operativa. *Estudis R&R, Control de recepció, fiabilitat*. ETSEIB. 2014.

[17] Departament d'Estadística i Investigació Operativa. *Introducció a l'estadística. Estadística descriptiva*. ETSEIB. 2013.

Bibliografia consultada:

French college of metrology. *Metrology in industry: the key for quality*. ISTE. 2006.

ABB. *Maintenance Guide Sidio Airus* Documentació interna. 2014.

ABB. *Manual del operador – Robot Studio*. Documentació interna. 2016

Innovmetric. *Polyworks Beginner guide* <<https://www.unavco.org/projects/project-support/polar/support/TLS/PolyWorksBeginnersGuide.pdf>> 2007 [Consulta: 21/05/2018]

Innovmetric, *Essentials –PolyWorks Inspector*. 2017

Quality digest. *The state of 3D imaging standards* <<https://www.qualitydigest.com/inside/cmsc-article/state-3-d-imaging-standards.html>> [Consulta: 11/04/2018]

Annexos

A. Resultats test exactitud

| Test VDI 2634/III | | Diàmetre 1 | Diàmetre 2 | Distància entre centres |
|-------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|
| Posició 0° | 1. Mesura | 49,969 | 49,974 | 1549,299 |
| | 2. Mesura | 49,939 | 49,974 | 1549,307 |
| | 3. Mesura | 50,017 | 49,988 | 1549,494 |
| | 4. Mesura | 49,961 | 50,067 | 1549,35 |
| | 5. Mesura | 49,934 | 49,972 | 1549,35 |
| | 6. Mesura | 49,969 | 49,956 | 1549,496 |
| Posició 45° | 1. Mesura | 49,978 | 49,944 | 1549,3 |
| | 2. Mesura | 49,968 | 49,971 | 1549,349 |
| | 3. Mesura | 49,971 | 49,975 | 1549,348 |
| | 4. Mesura | 49,977 | 49,994 | 1549,337 |
| | 5. Mesura | 49,939 | 49,947 | 1549,331 |
| | 6. Mesura | 49,967 | 49,999 | 1549,345 |
| Posició 90° | 1. Mesura | 49,937 | 50,049 | 1549,474 |
| | 2. Mesura | 50,038 | 50,001 | 1549,472 |
| | 3. Mesura | 50,022 | 50,007 | 1549,479 |
| | 4. Mesura | 50,018 | 49,991 | 1549,513 |
| | 5. Mesura | 50,04 | 50,051 | 1549,51 |
| | 6. Mesura | 50,005 | 50,026 | 1549,498 |

B. Resultats test precisió

| Nº Inspecció | Test repetibilitat | | | Test reproductibilitat | | |
|-----------------|--------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|
| | Diàm. 1 | Dist. 1 | Dist. 2 | Diàm. 1 | Dist. 1 | Dist 2. |
| 1 | 5,979 | 220,031 | 727,998 | 5,984 | 220,027 | 728,006 |
| 2 | 5,968 | 220,023 | 727,986 | 5,966 | 220,053 | 727,993 |
| 3 | 5,962 | 220,037 | 727,947 | 5,985 | 220,023 | 727,983 |
| 4 | 5,974 | 220,042 | 727,969 | 5,963 | 220,045 | 727,953 |
| 5 | 5,980 | 220,043 | 727,970 | 5,961 | 220,030 | 728,002 |
| 6 | 5,963 | 220,036 | 727,945 | 5,968 | 220,026 | 727,981 |
| 7 | 5,963 | 220,023 | 728,002 | 5,983 | 220,058 | 727,956 |
| 8 | 5,981 | 220,044 | 727,972 | 5,968 | 220,056 | 727,992 |
| 9 | 5,978 | 220,026 | 727,993 | 5,966 | 220,058 | 727,948 |
| 10 | 5,965 | 220,051 | 727,946 | 5,988 | 220,055 | 727,949 |
| 11 | 5,969 | 220,043 | 727,985 | 5,986 | 220,053 | 727,977 |
| 12 | 5,982 | 220,033 | 727,989 | 5,966 | 220,028 | 728,009 |
| 13 | 5,966 | 220,049 | 727,992 | 5,981 | 220,049 | 728,008 |
| 14 | 5,965 | 220,039 | 727,939 | 5,968 | 220,027 | 727,992 |
| 15 | 5,981 | 220,053 | 727,982 | 5,987 | 220,058 | 727,970 |
| 16 | 5,983 | 220,056 | 727,954 | 5,981 | 220,023 | 728,014 |
| 17 | 5,982 | 220,048 | 727,988 | 5,970 | 220,052 | 728,014 |
| 18 | 5,983 | 220,026 | 727,978 | 5,978 | 220,024 | 727,947 |
| 19 | 5,981 | 220,059 | 728,006 | 5,983 | 220,030 | 728,027 |
| 20 | 5,972 | 220,040 | 727,941 | 5,966 | 220,026 | 728,032 |
| 21 | 5,984 | 220,051 | 727,990 | 5,983 | 220,021 | 727,961 |
| 22 | 5,979 | 220,025 | 727,978 | 5,965 | 220,032 | 728,020 |
| 23 | 5,973 | 220,048 | 727,946 | 5,962 | 220,054 | 727,977 |
| 24 | 5,970 | 220,033 | 727,953 | 5,979 | 220,018 | 727,971 |
| 25 | 5,980 | 220,027 | 727,940 | 5,986 | 220,059 | 728,015 |
| 26 | 5,964 | 220,045 | 727,960 | 5,962 | 220,051 | 727,961 |
| 27 | 5,970 | 220,025 | 727,950 | 5,987 | 220,046 | 728,027 |
| 28 | 5,968 | 220,023 | 727,944 | 5,960 | 220,057 | 727,981 |
| 29 | 5,965 | 220,028 | 727,942 | 5,984 | 220,024 | 727,947 |
| 30 | 5,963 | 220,056 | 727,944 | 5,983 | 220,052 | 728,009 |